HAL
open science

Place des substituts végétaux issus de la filière oléo-protéagineuse dans la transition protéique de la population française : analyses, simulations et optimisations nutritionnelles

Marion Salomé

To cite this version:

Marion Salomé. Place des substituts végétaux issus de la filière oléo-protéagineuse dans la transition protéique de la population française : analyses, simulations et optimisations nutritionnelles. Alimentation et Nutrition. Université Paris-Saclay, 2021. Français. NNT : 2021UPASB046 . tel-03821872

HAL Id: tel-03821872

https://pastel.hal.science/tel-03821872v1

Submitted on 20 Oct 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Place des substituts végétaux issus de la filière oléo-protéagineuse dans la transition protéique de la population française : analyses, simulations et optimisations nutritionnelles.

Role of plant-based substitutes from oil- and protein-rich plants in the protein transition of the French population: nutritional analyses, simulations and optimizations.

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 581, Agriculture, Alimentation, Biologie, Environnement et Santé (ABIES)

Spécialité de doctorat : Sciences de la nutrition

Unité de recherche : Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France

Référent : AgroParisTech

Thèse présentée et soutenue à Paris-Saclay, le 18/10/2021, par

Marion SALOMÉ

Composition du Jury

Irène MARGARITIS Professeure, Université Côte d'Azur	Présidente
Katia CASTETBON Professeure, Ecole de Santé Publique (Bruxelles)	Rapporteuse & Examinatrice
Caroline MÉJEAN Directrice de Recherche, INRAE – Centre Occitanie - Montpellier	Rapporteuse & Examinatrice
Anne SAINT-EVE Maîtresse de conférences, AgroParisTech (Université Paris-Saclay)	Examinatrice
Louis-Georges SOLER Directeur de Recherche, INRAE – Centre Ile-de-France - Versailles	Examinateur

Direction de la thèse

François MARIOTTI Professeur, AgroParisTech (Université Paris-Saclay)	Directeur de thèse
Jean-François HUNEAU Professeur, AgroParisTech (Université Paris-Saclay)	Co-Encadrant & Invité
Elodie TORMO Ingénieure, Terres Univia	Invitée

Thèse de doctorat

NNT : 2021UPASB046

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans la participation de nombreuses personnes à qui je souhaite transmettre toute ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier Katia Castetbon et Caroline Méjean qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteuses de ma thèse, ainsi que Irène Margaritis, Anne Saint-Eve et Louis-Georges Soler qui m'ont fait l'honneur d'être examinateur·trices de ma thèse.

Je remercie Terres Univia pour le financement de ce travail de thèse et plus particulièrement Noëmie Simon et Elodie Tormo pour tous les échanges constructifs.

Je remercie Claire Gaudichon de m'avoir accueillie au sein du laboratoire PNCA durant ces trois années.

Je tiens à remercier tout particulièrement mon directeur de thèse, François Mariotti, pour m'avoir fait confiance pour mener cette thèse et pour son précieux encadrement. Je salue particulièrement sa disponibilité, ses encouragements et retours positifs qui m'ont donné confiance en mon travail.

Je remercie également mon co-encadrant Jean-François Huneau pour toutes ses contributions et remarques pertinentes. Je souhaite également remercier Hélène Fouillet pour sa précieuse aide et disponibilité lors de ma troisième année de thèse.

Je remercie également les membres du comité de suivi de thèse, Benjamin Allès et Marie-Noëlle Maillard, pour les échanges et les précieux conseils pour mener au mieux la thèse.

Merci à l'ensemble des personnes avec qui j'ai eu l'occasion de collaborer pendant ces trois années de thèse : Carine Dubuisson, Ariane Dufour, Serge Hercberg, Emmanuelle Kesse-Guyot, Pascal Leroy, Marie-Noëlle Maillard, Marie-Charlotte Nicaud, Mathilde Touvier, Jean-Luc Volatier et Juhui Wang.

Merci à l'ensemble des membres du laboratoire PNCA pour les moments partagés durant ces trois années.

Merci aux stagiaires que j'ai eu le plaisir d'encadrer pendant ma thèse : Laura, Axelle et Capucine.

Merci à tous les doctorants et jeunes docteurs sans qui ces trois années de thèse n'auraient pas été aussi agréables : Alya, Alison, Armelle, Chloé, Clélia, Elie, Erwan, Florence, Gabrielle, Gaëtan, Joanna, Joséphine, Laurianne, Moufidath, Nathalie, Sandra, Soukaïna, Trenton.

Merci à mes parents, à Virginie, Clémence, Adrien, Matthias, Nino, Basile, Arthur, Gabriel et Alisha pour leur soutien, leur amour, et tous les moments partagés.

Merci à mes amis pour leur présence.

Enfin, merci à toi, Nicolas, pour ton soutien sans faille, ton intérêt pour mon travail, tes nombreux encouragements et mots rassurants. Merci de veiller sur moi.

RÉSUMÉ

Afin de rendre les régimes alimentaires occidentaux plus durables, un changement d'alimentation s'impose. Notamment, la réduction de la consommation de produits animaux permettrait de réduire les impacts environnementaux de l'alimentation et d'améliorer la santé des populations, à condition de favoriser des aliments végétaux favorables pour la santé. Dans ce contexte, on observe un développement rapide de produits de substitution à la viande et aux produits laitiers, qui pourraient faciliter la consommation de protéines végétales. Cependant, l'impact de leur consommation sur la qualité de l'alimentation et la santé a été peu caractérisé. L'objectif de cette thèse était d'étudier la place des aliments sources de protéines végétales, et plus particulièrement des substituts végétaux aux produits animaux, dans le cadre d'une transition alimentaire favorisant les protéines végétales.

Par des études d'observation, nous avons constaté que les sources de protéines végétales étaient actuellement peu diversifiées car principalement apportées par les produits céréaliers. Puis par des modèles de simulation de changement de régimes alimentaires, nous avons montré que les modifications de consommation de produits animaux étaient associées aux profils d'adéquation nutritionnelle de telle sorte qu'un mélange diversifié d'aliments protéiques végétaux était à privilégier en substitution. De même, les substituts végétaux sont très hétérogènes, et ceux à base de légumineuses sont apparus comme les plus appropriés pour remplacer les produits animaux. Enfin, par des modèles d'optimisation, nous avons montré qu'il était possible de composer des produits végétaux de très forte valeur nutritionnelle pour se substituer à la viande et que lors de la modélisation de régimes alimentaires plus sains, l'introduction de substituts végétaux pouvait favoriser la réduction de la consommation de viande, d'autant plus s'ils sont enrichis en fer et zinc.

ABSTRACT

A dietary shift is needed to make Western diets more sustainable. In particular, reducing the consumption of animal products would reduce the environmental impacts of food consumption and improve population health, provided that the consumption of healthy plant-based foods is preferred. In this context, there is a growing interest for alternative products to meat and dairy products (i.e. plant-based meat and dairy substitutes), which could facilitate the adoption of a more plant-based diet. However, the impact of the consumption of plant-based substitutes on diet quality and health has been poorly characterized. The objective of this thesis was to study the role of plant protein foods, and more specifically plant-based substitutes, in the context of a dietary transition in favor of plant proteins.

Using observational studies, we found that plant protein sources were currently poorly diversified, being mainly provided by grain products. Then, using simulation models of dietary changes, we showed that reductions in animal product consumption were associated with nutrient adequacy profiles, so that a diversified mix of plant protein foods should be preferred as a replacement. Furthermore, the quality of plant-based substitutes is very heterogeneous, and plant-based substitutes made with legumes appeared to be the most appropriate to replace animal products. Finally, using optimization models, we have shown that plant-based products with a very high nutritional value can be designed to replace meat and that when modeling healthier diets, the introduction of plant-based substitutes could favor the reduction of meat consumption, especially if they are fortified with iron and zinc.

NOTE RELATIVE AU FINANCEMENT

Ces travaux de thèse ont reçu un financement de Terres Univia, l’interprofession des huiles et protéines végétales. Terres Univia n’est pas intervenu dans la conception et le déroulement des travaux, l'analyse des résultats, la préparation des manuscrits des articles, du manuscrit de thèse, ainsi que des communications, et la décision de rendre public les résultats.

SOMMAIRE

Remerciements 3
Résumé 4
Abstract 5
Note relative au financement 6
Sommaire 7
Liste des figures 9
Liste des tableaux 11
Abréviations 12
Valorisation scientifique 13
Chapitre I : Introduction bibliographique 16
1. Durabilité des régimes alimentaires : constat et identification de régimes durables 16
1.1. Les régimes alimentaires actuels ne sont pas durables 16
1.2. Comment transformer les régimes alimentaires vers des régimes plus durables ?... 23
1.3. Acceptabilité et adoption des régimes alimentaires végétalisés 28
Messages clés de la première partie de l'introduction 34
2. Régime végétalisés, apports nutritionnels et santé 35
2.1. Type de protéines, qualité de l'alimentation et santé 35
2.2. Bénéfices et risques des régimes végétalisés 42
2.3. Impacts sur la santé en fonction des profils d'aliments végétaux consommés 53
Messages clés de la deuxième partie de l'introduction 57
3. Emergence de nouveaux produits pour remplacer les produits animaux : les substituts végétaux 58
3.1. Définition des substituts végétaux 58
3.2. Evolution de leur consommation dans les pays occidentaux 61
3.3. Qualité nutritionnelle des substituts végétaux 64
Messages clés de la troisième partie de l'introduction 73
Chapitre II : Travaux de thèse 75
1. Justification des travaux 75
1.1. Développement d'outils et caractérisation de l'alimentation en France, en lien avec la consommation de protéines 76
1.2. Modélisations de régimes alimentaires où les produits animaux sont substitués par des produits végétaux 82

1.3. Optimisations mathématiques afin d'évaluer les potentiels des substituts à la viande dans une alimentation saine 84

2. Articles..... 87

2.1. Article n°1 : La diversification des sources de protéines végétales est primordiale pour assurer l'adéquation nutritionnelle lors de la substitution des protéines animales par les protéines végétales dans la population adulte française (INCA3). 88

2.2. Article n°2 : La consommation d'aliments peu ou pas transformés est associée à un profil favorable de consommation protéique, à une meilleure qualité de l'alimentation et à un moindre risque cardiométabolique dans la population adulte française (INCA3), à l'inverse de la consommation de produits ultra-transformés. 124

2.3. Article n°3 : Développement et évaluation, dans deux populations adultes françaises, d'un indice de sécurité nutritionnelle combinant des estimations probabilistes de risques de carences. 160

2.4. Article n°4 : Substituer la viande ou les produits laitiers avec des substituts végétaux a des impacts faibles mais hétérogènes sur la qualité de l'alimentation et la sécurité nutritionnelle : une étude de simulation dans l'étude INCA3. 202

2.5. Article n°5 : Impacts de la substitution des produits animaux par des substituts végétaux sur le risque de carence et la mortalité par maladies non-transmissibles : une étude de simulation sur les adultes français (INCA3). 241

2.6. Article n°6 : Les bénéfices sur la qualité de l'alimentation de la substitution de la viande peuvent être élevés si la composition nutritionnelle des substituts de viande est optimisée : une étude de modélisation chez les adultes français (INCA3). 262

2.7. Article n°7 : Les substituts végétaux de viande sont utiles pour concevoir des régimes alimentaires plus sains s'ils ont une composition nutritionnelle adéquate : une étude d'optimisation chez les adultes français (INCA3) 301

Chapitre III : Discussion 335

1. Discussion générale..... 335

2. Conclusion 346

3. Perspectives..... 348

Références 350

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Apports alimentaires et nutritionnels ajustés sur l'âge chez les adultes de plus de 25 ans en 2017 17
Figure 2: Emissions de gaz à effet de serre pour différents aliments en fonction des différentes étapes de la chaîne alimentaire 20
Figure 3 : Empreinte carbone moyenne par secteur d'un français en 2017 et niveau à atteindre afin de respecter les Accords de Paris (+2°C par rapport à l'époque préindustrielle) d'après les modélisations du cabinet Carbone 4 23
Figure 4: Cibles scientifiques pour un régime alimentaire planétaire, avec des gammes possibles, pour un apport de 2500 kcal par jour 24
Figure 5 : Différences relatives d'émissions de GES (kgCO_2eq/hab/an) entre des régimes moyens actuels et différents régimes durables 27
Figure 6: Consommation individuelle française des viandes : comparaison de la structure entre 1999, 2009 et 2019 29
Figure 7: Répartition des individus de l'enquête IFOP/FranceAgriMer 2020 en fonction de leur régime alimentaire déclaré, couplé à leur consommation de viande déclarée 30
Figure 8: Les motivations de la faible consommation ou de la non-consommation de viande chez les végétariens (dont végétaliens) et flexitariens déclarés 31
Figure 9: Contribution de la viande, des produits laitiers, des aliments protéiques végétaux et des pains aux apports nutritionnels dans l'étude NHANES (2007-2010, n= 11 296) 36
Figure 10: Hazard ratios (HR) et intervalles de confiance à 95% (CI) pour le risque de diabète de type 2 associé à la substitution d'une portion d'aliments protéiques animaux (produits laitiers, volaille, œuf, viande rouge, poisson ou viande transformée), de céréales raffinées ou de pomme de terre par une portion d'aliments protéiques végétaux (variable composite comprenant des céréales complètes, légumineuses, cacahuètes, beurre de cacahuètes et fruits à coque) dans les cohortes NHS (n=72 992), NHS2 (n=92 088) et HPFS (n=40 722). 38
Figure 11 : Apports nutritionnels par quartiles de consommation de légumineuses à partir des données de l'enquête Ricksmaten 2010-2011 (n=1760) en Suède 43
Figure 12: Estimation du nombre de morts évitées (totales, par maladies cardiovasculaires et par cancers) évitées ou ajoutées par scénarios de réduction des émissions de GES en comparaison au régime de référence 45
Figure 13 : Prévalence d'inadéquation d'apports en nutriments calculés à partir des seules consommations alimentaires, par sexe et régime alimentaire 48
Figure 14: Représentation du statut en iode évalué par la concentration médiane urinaire d'iode (UIC) pour les études incluses dans la revue de Eveleigh et al. La barre grise représente la fourchette optimale du statut en iode (100-299 µg/L) 50
Figure 15: Pourcentage de végétariens (VEG) et non-végétariens (NV) sous les valeurs seuils de ferritine selon le sexe 51
Figure 16: Hazard ratios (HR) et intervalles de confiances à 95% pour le risque de diabète de type 2 en fonction des déciles des scores PDI, hPDI et uPDI dans les cohortes NHS (n=69 949), NHS2 (n=90 239) et HPFS (n=40 539) 55

Figure 17: Proportion de l'apport énergétique provenant des aliments peu transformés (unprocessed foods) et ultra-transformés (UPF) en fonction du régime alimentaire dans la cohorte NutriNet-Santé (2014-2018, n=21 212)..... 56
Figure 18: Nutri-Score de différentes catégories de substituts végétaux de viande..... 66
Figure 19 : Composition nutritionnelle (/100g) de substituts de viande catégorisés en fonction de la principale source de protéines (moyenne ± SD)..... 66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Empreinte eau de la production de différents aliments d'origine végétale et animale, à l'échelle mondiale 22
Tableau 2 : Système de notation des scores PDI, hPDI et uPDI 54
Tableau 3: Liste d'ingrédients d'une sélection de substituts de viande 59
Tableau 4: Apports et contribution aux apports en nutriments des produits laitiers et de la viande pour les adultes de 18-79 ans de l'étude INCA3 70
Tableau 5 : Description des groupes de la classification NOVA 79

ABRÉVIATIONS

AAI : Acide aminé indispensable
ADEME : Agence de la transition écologique (anciennement Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie)
AHS : Adventist Health Study
ALA : Acide alpha-linolénique
Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
AS : Adequacy subscore (sous-score d'adéquation du PANDiet)
AUT : Aliments ultra-transformés
AVC : Accident vasculaire cérébral
BNM : Besoin Nutritionnel Moyen
Ciqual : Centre d'information sur la qualité des aliments
CLCV : Consommation Logement Cadre de Vie (Association nationale de défense des consommateurs et usagers)
CRÉDOC : Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de Vie
DHA : Acide docosahexaénoïque
EFSA : European Food Safety Authority
EPA : Acide eicosapentaénoïque
EpiDiet : Evaluate the Potential Impact of a Diet
EPIC : European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition
FAO : Food and Agriculture Organization of the United Nations (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
GBD : Global Burden of Disease
GEPV : Groupe d'étude et de promotion des protéines végétales
GES : Gaz à effet de serre
hPDI : Healthy plant-based diet index
HPFS : Health Professionals Follow-up Study
IFOP : Institut Français d'Opinion Publique
IMC : Indice de masse corporelle
INCa : Institut National du Cancer
INCA : Etude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires
LA : Acide linoléique
MS : Moderation subscore (sous-score de modération du PANDiet)
NHANES : National Health and Nutrition Examination Survey
OMS : Organisation Mondiale pour la Santé (WHO : World Health Organization)
PDI : Plant-based diet index
PNNS : Programme national nutrition santé
PRIME : Preventable Risk Integrated ModEl
RNP : Référence nutritionnelle pour la population
NHS : Nurses' Health Study
uPDI : Unhealthy plant-based diet index
WCRF : World Cancer Research Fund

VALORISATION SCIENTIFIQUE

Articles scientifiques

Faisant l'objet du travail de thèse

- Publiés

Marion Salomé, Erwan de Gavelle, Ariane Dufour, Carine Dubuisson, Jean-Luc Volatier, Hélène Fouillet, Jean-François Huneau, François Mariotti. **Plant-Protein Diversity Is Critical to Ensuring the Nutritional Adequacy of Diets When Replacing Animal With Plant Protein: Observed and Modeled Diets of French Adults (INCA3).** The Journal of Nutrition, 2020. https://doi.org/10.1093/jn/nxz252

Marion Salomé, Emmanuelle Kesse-Guyot, Hélène Fouillet, Mathilde Touvier, Serge Hercberg, Jean-François Huneau, François Mariotti. **Development and evaluation of a new dietary index assessing nutrient security by aggregating probabilistic estimates of the risk of nutrient deficiency in two French adult populations.** British Journal of Nutrition, 2020. https://doi.org/10.1017/S0007114520005115

Marion Salomé, Laura Arrazat, Juhui Wang, Ariane Dufour, Carine Dubuisson, Jean-Luc Volatier, Jean-François Huneau, François Mariotti. **Contrary to ultra-processed foods, the consumption of unprocessed or minimally processed foods is associated with favorable patterns of protein intake, diet quality and lower cardiometabolic risk in French adults (INCA3).** European Journal of Nutrition, 2021. https://doi.org/10.1007/s00394-021-02576-2

Marion Salomé, Jean-François Huneau, Capucine Le Baron, Emmanuelle Kesse-Guyot, Hélène Fouillet, François Mariotti. **Substituting Meat or Dairy Products with Plant-Based Substitutes Has Small and Heterogeneous Effects on Diet Quality and Nutrient Security: A Simulation Study in French adults (INCA3).** The Journal of Nutrition, 2021. https://doi.org/10.1093/jn/nxab146

- Soumis

Marion Salomé, François Mariotti, Marie-Charlotte Nicaud, Alison Dussiot, Emmanuelle Kesse-Guyot, Marie-Noëlle Maillard, Jean-François Huneau, Hélène Fouillet. **The potential effects of meat substitution on diet quality could be high if meat substitutes are optimized for nutritional composition – a modeling study in French adults (INCA3).**

- En préparation

Marion Salomé, François Mariotti, Alison Dussiot, Emmanuelle Kesse-Guyot, Jean-François Huneau, Hélène Fouillet. **Plant-based meat substitutes are useful to design healthier dietary patterns if adequately formulated: an optimization study in French adults (INCA3).**

Ne faisant pas l'objet du travail de thèse

- Soumis

Alison Dussiot, Hélène Fouillet, Juhui Wang, Marion Salomé, Jean-François Huneau, Emmanuelle Kesse-Guyot, François Mariotti. **Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc.**

Communications orales

Marion Salomé, Erwan de Gavelle, Ariane Dufour, Carine Dubuison, Jean-Luc Volatier, Hélène Fouillet, Jean-François Huneau, François Mariotti. **La diversification des sources de protéines végétales est primordiale pour assurer l'adéquation nutritionnelle lors de la substitution des protéines animales par les protéines végétales, dans la population adulte française (INCA3).** Journées Francophones de Nutrition, Rennes, 27-29 novembre 2019.

Marion Salomé. **What are the links between dietary diversity and diet quality? General observations and application to modelled substitutions of animal with plant protein.** Journées des Doctorants ABIES, en ligne, 22-23 septembre 2020.

Marion Salomé, Emmanuelle Kesse-Guyot, Hélène Fouillet, Mathilde Touvier, Serge Hercberg, Jean-François Huneau, François Mariotti. **Développement et évaluation d'un indice de sécurité nutritionnelle combinant des estimations probabilistes de risques de carences.** Journées Francophones de Nutrition, en ligne, 25-27 novembre 2020.

Marion Salomé, Hélène Fouillet, Marie-Charlotte Nicaud, Alison Dussiot, Emmanuelle Kesse-Guyot, Marie-Noëlle Maillard, Jean-François Huneau, François Mariotti. **Optimizing the nutritional composition of a meat substitute intended to replace meat in observed diet results in marked improvement of the diet quality of French adults.** NUTRITION 2021 LIVE ONLINE, en ligne, 7-10 juin 2021.

Communications affichées

Faisant l'objet du travail de thèse

Laura Arrazat, Marion Salomé, Ariane Dufour, Carine Dubuisson, Jean-Luc Volatier, Jean-François Huneau, François Mariotti. **La consommation de produits bruts, transformés et ultra-transformés est différemment associée à la qualité de l'alimentation et la consommation de protéines, dans la population adulte française (INCA3).** Journées Francophones de Nutrition, Rennes, 27-29 novembre 2019.

Marion Salomé, Jean-François Huneau, Hélène Fouillet, François Mariotti. **Impacts de l'intégration dans l'alimentation de substituts de viande sur la qualité nutritionnelle des régimes des français : une étude de simulation sur l'échantillon INCA3.** Journées Francophones de Nutrition, en ligne, 25-27 novembre 2020.

Ne faisant pas l'objet du travail de thèse

Alison Dussiot, Hélène Fouillet, Juhui Wang, Marion Salomé, Jean-François Huneau, Emmanuelle Kesse-Guyot, François Mariotti. **The health value of modelled healthy eating patterns is largely constrained by the current reference values for bioavailable iron and zinc.** NUTRITION 2021 LIVE ONLINE, en ligne, 7-10 juin 2021.

CHAPITRE I

—

INTRODUCTION BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : INTRODUCTION BIBLIOGRAPHIQUE

1. Durabilité des régimes alimentaires : constat et identification de régimes durables

1.1. Les régimes alimentaires actuels ne sont pas durables

Les régimes alimentaires durables sont définis par l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS) comme étant des régimes sains, avec un faible impact environnemental, économiquement accessible et culturellement acceptable. Ces régimes doivent permettre de couvrir les besoins nutritionnels, en limitant les excès en certains nutriments et l'exposition aux contaminants alimentaires. (FAO & WHO, 2019). Or plusieurs éléments nous indiquent que les systèmes alimentaires actuels sont peu durables.

Impacts des régimes alimentaires actuels sur la santé

Dans son rapport de 2014 sur le statut mondial des maladies non-transmissibles (WHO, 2014), l'OMS indiquait que le nombre de décès causés par des maladies non transmissibles augmente depuis les années 2000 et devrait continuer à augmenter dans les années à venir. Les maladies cardiovasculaires, les cancers, les maladies respiratoires chroniques et le diabète sont les quatre causes principales de décès de maladies non transmissibles dans le monde. Bien que cette augmentation puisse en partie s'expliquer par une augmentation de la population et son vieillissement, les modes de vie actuels sont aussi mis en cause. Notamment, l'OMS identifie plusieurs facteurs de risque sur lesquels il faudrait agir pour réduire la mortalité par maladies non transmissibles : réduire la consommation d'alcool et de tabac, réduire la consommation de sel, augmenter l'activité physique et prévenir le surpoids, l'obésité et le diabète. Certains de ces facteurs de risques sont directement liés à notre alimentation.

En effet, une étude menée dans le cadre du projet Global Burden of Disease (GBD) a estimé à partir des apports en 15 aliments et nutriments d'adultes de plus de 25 ans dans 195 pays, les effets de chaque facteur alimentaire sur la mortalité par maladies non-transmissibles (Afshin et al., 2019). Il a été estimé qu'en 2017, 11 millions de morts, principalement par maladies cardiovasculaires, cancers ou diabète de type 2, étaient attribuables à l'alimentation. Les principales causes étaient les apports excessifs en sodium, la consommation insuffisante de céréales complètes et la consommation insuffisante de fruits. Cette étude souligne également que dans la majorité de régions du monde, les régimes actuels sont sous-optimaux et contiennent des quantités excessives de viande rouge, charcuterie, boissons sucrées et sodium et des consommations insuffisantes de fruits, légumes, légumineuses, céréales complètes, fruits à coque et graines, lait, calcium, fibres et acides gras polyinsaturés (Afshin et al., 2019) (**Figure 1**). En particulier, l'OMS souligne également que la consommation de sel est trop élevée dans le monde, environ 10g/jour alors qu'elle recommande de ne pas dépasser 5g/jour car la consommation excessive de sel augmente le risque d'hypertension et de maladies cardiovasculaires (WHO, 2014). Comme l'a également souligné l'OMS, les pays en voie de développement sont les plus touchés par la mortalité par maladies non transmissibles (Afshin et al., 2019; WHO, 2014).

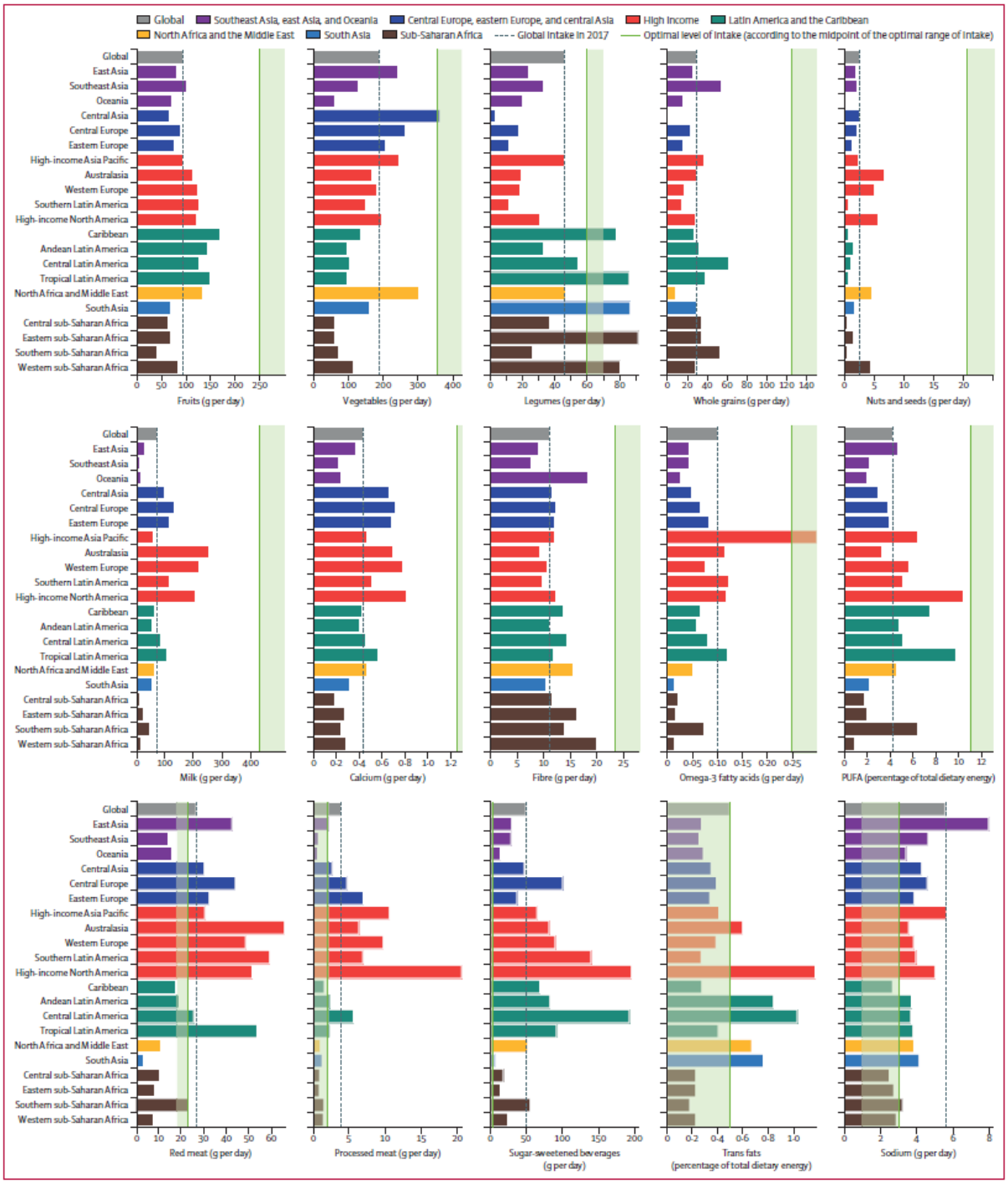


Figure 1: Apports alimentaires et nutritionnels ajustés sur l'âge chez les adultes de plus de 25 ans en 2017 (le trait pointillé représente l'apport mondial en 2017 et la bande verte le niveau optimal de consommation) (extrait de Afshin et al., 2019)

De par la diminution de l'activité physique, l'augmentation de la sédentarité et nos consommations alimentaires, la prévalence de l'obésité a doublé depuis 1980 (WHO, 2014). Or le surpoids et l'obésité sont des facteurs de risque des maladies cardiovasculaire. En 2014, l'OMS estime que parmi les adultes de plus de 18 ans, 11% des hommes sont obèses (38% en surpoids) et 15% des femmes sont obèses (40% en surpoids). La prévalence d'obésité est plus élevée dans les pays les plus développés (WHO, 2014) mais augmente dans toutes les régions du monde (FAO et al., 2020). De même, l'apparition de certains cancers est attribuable

à nos modes de vie et notre alimentation. En France, on estime que 40% des cancers pourraient être évités en adaptant nos modes de vies (INCa, 2021). Plus particulièrement, 5,4% des cancers seraient causés par une alimentation déséquilibrée, 5,4% par le surpoids et 8% par la consommation d'alcool. Le World Cancer Research Fund (WCRF) a regroupé les connaissances scientifiques sur les relations entre les expositions alimentaires et les risques de cancer (WCRF/AICR, 2018) et associe la consommation de charcuterie et de viande rouge à un risque plus élevé de cancer colorectal, avec un niveau de preuve convainquant pour la charcuterie et probable pour la viande rouge. A l'inverse, la consommation de céréales complètes, d'aliments contenant des fibres et de produits laitiers serait associée à une réduction du risque de cancer du côlon, avec un niveau de preuve probable. De même, la consommation de fruits et légumes réduirait le risque de certains cancers, alors que la consommation d'alcool et le surpoids augmentent le risque de certains cancers.

Ainsi, les régimes alimentaires actuels dans le monde se caractérisent par des consommations insuffisantes d'aliments à favoriser, comme les fruits, légumes, céréales complètes, et une consommation excessive d'aliments à limiter, comme le sel ou les produits carnés (Afshin et al., 2019). En effet, la consommation de viande dans le monde est en augmentation depuis plusieurs années, bien qu'elle commence à stagner ou diminuer dans les pays les plus développés (Godfray et al., 2018). Cette augmentation est notamment due à une augmentation de la population mais également à une augmentation des revenus dans les pays en voie de développement (Godfray et al., 2018; Wu et al., 2014). Cependant, bien que la viande soit une excellente source de protéines et certains micronutriments comme le fer, le zinc ou la vitamine B12 (Cocking et al., 2020), une consommation excessive de viande rouge et charcuterie peut avoir des effets délétères sur la santé, comme un risque augmenté de cancer, comme précédemment évoqué, mais également de maladies cardiovasculaires et de diabète de type 2 (Anses, 2016b). Ainsi, le WRCF recommande de ne pas dépasser trois portions de viande hors volaille par semaine (350-500g / semaine) et de consommer le moins possible de charcuterie (WCRF/AICR, 2018). En France, l'Anses recommande de ne pas dépasser 500g de viande hors volaille par semaine et 25g/j de charcuterie (Anses, 2016c) et plusieurs pays européens ont adopté des recommandations similaires (Cocking et al., 2020).

On observe également dans le monde une augmentation rapide de la disponibilité et de la consommation d'aliments ultra-transformés, qui pourraient participer à l'augmentation du surpoids, de l'obésité et des maladies non-transmissibles (Popkin et al., 2012). Bien que la transformation des aliments ait toujours existé pour augmenter la durée de vie des denrées agricoles et améliorer la sécurité alimentaire, les aliments ultra-transformés se caractérisent comme des aliments ayant subi des procédés de transformation industriels et/ou composés de nombreux ingrédients, dont des additifs (Baker et al., 2020; Monteiro, Cannon, Lawrence, et al., 2019). Ce sont souvent des aliments d'une grande praticité et prêt-à-consommer comme certains plats préparés, gâteaux apéritifs, confiseries ou boissons sucrées. Les ventes de produits ultra-transformés augmentent dans toutes les régions du monde (Baker et al., 2020) et dans certains pays, les produits ultra-transformés constituent la principale source d'apport énergétique (Martínez Steele et al., 2016; Rauber et al., 2018). Or, il a été montré qu'une consommation importante de produits ultra-transformés était associée à une consommation plus importante de nutriments favorisant l'apparition de maladies cardio-vasculaires (sucres, acides gras saturés, sodium, forte densité énergétique) ainsi qu'une consommation plus faible de protéines, fibres et micronutriments (Monteiro, Cannon, Lawrence, et al., 2019). La consommation d'aliments ultra-transformés a également été associée à un risque plus élevé

de maladie non transmissibles, dont les maladies cardiovasculaires et l'obésité (Monteiro, Cannon, Lawrence, et al., 2019).

Cependant, à côté d'un schéma alimentaire favorisant le surpoids et les maladies non transmissibles (Popkin, 2006; Popkin et al., 2012), la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture) estime que 690 millions de personnes souffrent toujours de la faim dans le monde, soit 8,9% de la population, alors que la production alimentaire serait suffisante pour nourrir toute la planète (FAO et al., 2020). Ainsi, l'enjeu associé à la composition d'un régime alimentaire durable est de lutter contre les excès alimentaires, mais également de lutter contre la sous-nutrition par l'apport suffisant de nutriments essentiels (FAO et al., 2020). Or, d'un point de vue économique, il a été estimé en 2017 que 3 milliards d'individus n'avaient pas les moyens d'adopter un régime sain, qui coûterait 5 fois plus cher qu'un régime permettant seulement de subvenir aux besoins énergétiques (FAO et al., 2020). Il y a alors un vrai enjeu d'accessibilité économique à une alimentation équilibrée car actuellement les aliments les plus denses énergétiquement sont généralement moins cher et plus accessibles que les aliments les plus denses nutritionnellement (Andrieu et al., 2006; FAO et al., 2020).

Impacts environnementaux des régimes alimentaires

Les systèmes alimentaires actuels ont également un impact non négligeable sur l'environnement, qui risque de s'amplifier puisque la population mondiale continue d'augmenter et pourrait atteindre près de 10 milliards d'individus en 2050 (Tilman et al., 2002; Wu et al., 2014). À l'échelle mondiale, l'alimentation représenterait entre 22 et 37% des émissions de gaz à effet de serre (GES) de nature anthropique (Rogissart et al., 2019). En France, on estime que l'alimentation représente 24% de l'empreinte totale carbone des français (Barbier et al., 2019). Les deux tiers des émissions de gaz à effet de serre proviennent de la production agricole, suivi du transport des produits alimentaires (19%). Les principaux gaz émis par l'agriculture sont le méthane, issus principalement de la fermentation entérique des animaux, et le protoxyde d'azote, issus de l'utilisation d'engrais et pesticides. On estime également que 85% des émissions issues de la production agricole française proviendrait de l'élevage (Barbier et al., 2019) et dans le monde, deux tiers des émissions de GES liées à l'alimentation serait due à l'élevage (Rogissart et al., 2019). En effet, l'empreinte carbone des produits animaux est généralement bien plus importante que celle des produits végétaux (Notarnicola et al., 2017; Ritchie & Roser, 2020) (**Figure 2**).

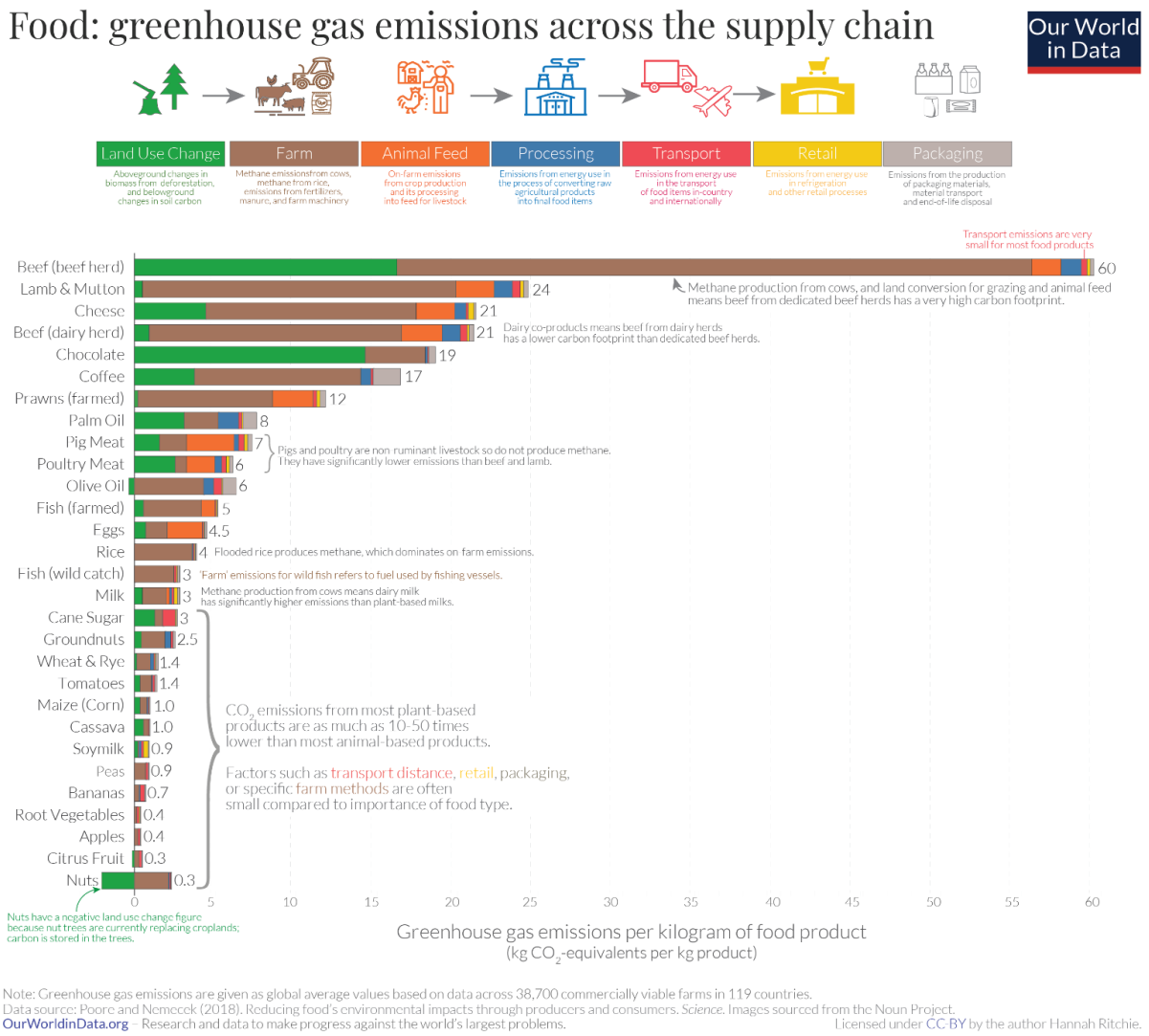


Figure 2: Emissions de gaz à effet de serre pour différents aliments en fonction des différentes étapes de la chaîne alimentaire (Ritchie & Roser, 2020)

En plus d'une importante contribution aux émissions de GES, l'agriculture nécessite une grande quantité de terre pour produire suffisamment de nourriture. En France, environ la moitié de la surface du territoire est dédiée à l'agriculture (Agreste, 2020). Or, dans un rapport de l'ADEME (Agence de la transition écologique), il a été montré que l'usage de la surface agricole était fortement corrélé au niveau de consommation de produits animaux et plus particulièrement de viande (Barbier et al., 2020). Le régime moyen d'un français, estimé à partir de la seconde étude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires (INCA2), est composé de 107g de viande par jour et nécessiterait 4280 m² de surface agricole par personne. Or cette surface peut grandement varier en fonction de si on consomme un régime végétalien (1200 m²/personne) ou riche en viande (5200 m² pour un régime composé de 170g/jour de viande). Il est estimé dans ce rapport qu'une augmentation de la consommation de viande de 10g par jour nécessiterait 200 m² de surface agricole supplémentaire et 80 kg d'équivalent CO_2 d'émissions supplémentaires par personne (Barbier et al., 2020).

La forte utilisation des surfaces agricoles par l'élevage est liée à l'espace nécessaire pour élever les animaux mais également à la surface dédiée pour produire leur alimentation (Mottet et al., 2017). Or, l'augmentation de la consommation de viande entraîne des changements

d'allocations des surfaces terrestres pour produire des céréales et du soja pour les animaux d'élevage, ce qui entraîne des déforestations, particulièrement en Amérique du Sud (Godfray et al., 2018). Ainsi, diminuer l'élevage permettrait de limiter cette expansion des terres agricoles et de rediriger une partie des surfaces agricoles vers la production directe d'aliments pour les humains plutôt que pour les animaux d'élevage. Cependant, Mottet et al. ont évalué qu'à l'échelle mondiale, 57% des terres utilisées pour l'élevage ne pourraient pas être converties en terres de culture et que l'alimentation des animaux d'élevage serait composée pour 86% d'aliments non comestibles pour les humains (Mottet et al., 2017). En effet, les animaux d'élevage permettent de convertir des matières premières non comestibles par l'homme (comme les pâturages) en protéines hautement digestibles et permettent également de valoriser les résidus de cultures dédiées à l'alimentation humaine (tourteaux issus de l'extraction des huiles, résidus de betterave sucrière, …) (Mottet et al., 2017; van Zanten et al., 2016). Cependant, un tiers de la production céréalière mondiale est dédiée à l'alimentation animale, alors que ces céréales pourraient être directement consommées par les humains (Mottet et al., 2017). Ainsi, une étude aux Pays-Bas a montré que pour nourrir de manière autonome la population néerlandaise (environ 15 millions de personnes), l'utilisation des terres dédiées à l'agriculture serait optimale pour des régimes dont 12% des protéines sont apportées par des aliments issus d'animaux terrestres (Van Kernebeek et al., 2016). A ce ratio, les résidus de cultures pour l'alimentation humaine peuvent être valorisés pour nourrir les animaux d'élevage et il n'est pas nécessaire de dédier des cultures uniquement pour l'élevage.

Finalement, l'agriculture nécessite également de grandes quantités d'eau. Sur la période 1996-2005, 92% de l'utilisation mondiale d'eau était dédiée à l'agriculture, le reste étant réparti entre la production industrielle (4.4%) et l'utilisation domestique (3.6%) (Hoekstra & Mekonnen, 2012). Bien que la grande majorité de l'eau dédiée à l'agriculture corresponde à de l'eau de pluie (également appelée eau verte) (80%), 11% de l'eau utilisée par l'agriculture est de l'eau bleue (eau douce de surface ou souterraine), ce qui représente 92% de l'utilisation mondiale d'eau bleue (Hoekstra & Mekonnen, 2012). L'élevage représente un tiers de l'utilisation de l'eau en agriculture, mais cette utilisation dépend des pays, des espèces et des modes de cultures (Mekonnen & Hoekstra, 2012). En effet, l'élevage sur pâturage nécessite généralement plus d'eau que l'élevage intensif. Mais lorsque l'on regarde dans le détail, cela s'explique par une plus grande quantité d'eau de pluie nécessaire pour les pâturages que pour les systèmes intensifs, alors que les pâturages nécessite moins d'eau bleue que les élevages intensifs (Mekonnen & Hoekstra, 2012). De même, il y a de fortes différences entre les espèces puisque produire une tonne de viande de volaille nécessite 4300 m^3 d'eau alors qu'il faut 15 400 m^3 d'eau pour produire une tonne de viande de bœuf. L'utilisation d'eau est généralement plus faible pour les produits d'origine végétale (Mekonnen & Hoekstra, 2012). Par exemple, les légumes nécessitent environ 300 m^3 d'eau/tonne, les céréales 1600 m^3 d'eau/tonne, les légumineuses 4000 m^3 d'eau/tonne, mais les fruits à coque nécessitent 9000 m^3 d'eau/tonne, dont 1400 m^3 d'eau bleue, soit plus que n'importe quel produit d'origine animal (**Tableau 1**).

Tableau 1: Empreinte eau de la production de différents aliments d'origine végétale et animale, à l'échelle mondiale (traduit et adapté de Mekonnen and Hoekstra, 2012)

	Empreinte eau par tonne de produit (m^3/tonne)			
	Eau verte	Eau bleue	Eau grise	Total
Aliments d'origine végétale				
Cultures sucrières	130	52	15	197
Légumes	194	43	85	322
Racines amylacées	327	16	43	387
Fruits	726	147	89	962
Céréales	1 232	228	184	1 644
Cultures oléagineuses	2 023	220	121	2 364
Légumineuses	3 180	141	734	4 055
Fruits à coque	7 016	1 367	680	9 063
Aliments d'origine animale				
Lait	863	86	72	1 020
Œufs	2 592	244	429	3 265
Viande de volaille	3 545	313	467	4 325
Beurre	4 695	465	393	5 553
Viande de porc	4 907	459	622	5 988
Viande ovine/caprine	8 253	457	53	8 763
Viande de boeuf	14 414	550	451	15 415

L'eau verte correspond à l'eau de pluie, l'eau bleue à l'eau douce de surface ou souterraine et l'eau grise à l'eau polluée par les processus de production

L'agriculture a également d'autres impacts environnementaux comme l'utilisation de pesticides et engrais ou le rejet de polluants qui entraînent des perturbations des cycles de l'azote et du phosphore et perturbent les écosystèmes terrestres et marins (Tilman et al., 2002). Il y a également une perte de diversité des espèces cultivées (60% de l'alimentation humaine est fournie pas le blé, le riz et le maïs) qui rend les cultures plus vulnérables aux maladies et ravageurs (Tilman et al., 2002) et une surexploitation des ressources marines qui menace la pérennité des stocks de poisson (FAO, 2020). Les systèmes alimentaires, et notamment les systèmes d'élevages intensifs posent également d'autres enjeux de santé car la proximité entre animaux peut favoriser l'apparition de maladies, et l'utilisation d'antibiotiques pourrait entraîner le développement de bactéries ou infections antibiorésistantes (Godfray et al., 2018; Tilman et al., 2002). Finalement, bien que nous n'ayons pas encore beaucoup de recul, l'utilisation de pesticides pourrait être défavorable à la santé et pourrait notamment être associé à un risque plus élevé de cancer (Rebouillat et al., 2021). Cependant, il existe une grande diversité de systèmes de production et d'élevage qui n'ont pas tous les mêmes impacts. Ainsi, les prairies sur lesquelles peuvent être élevées des animaux peuvent agir comme des puits de carbone, bien que leur capacité d'absorption du carbone dépende de nombreux paramètres (Godfray et al., 2018). De même, les productions mixtes d'élevage et de cultures permettent d'utiliser le lisier animal pour fertiliser les sols, ce qui limite l'utilisation d'engrais (Tilman et al., 2002). On considère également qu'un tiers de la nourriture est gaspillée, et réduire les pertes et gaspillage alimentaires permettrait à la fois d'améliorer l'accès à la nourriture et réduire l'empreinte environnemental de la production alimentaire (Springmann et al., 2018).

Ainsi, les systèmes alimentaires mondiaux se retrouvent face à un double enjeu de devoir augmenter la production, en vue d'une augmentation de la population, tout en réduisant les impacts sur l'environnement (Tilman et al., 2002). Nous avons également vu que la consommation alimentaire actuelle n'était pas favorable à la santé en favorisant l'apparition

de maladies non-transmissibles. Ainsi, bien qu'il existe de nombreuses solutions qui pourraient être mises en place à l'échelle de la production agricole pour rendre l'agriculture plus durable (Springmann et al., 2018; Tilman et al., 2002), il semble également nécessaire d'adapter les régimes alimentaires pour les rendre plus durables (Sabaté & Soret, 2014). En effet, pour respecter les Accords de Paris et limiter la hausse des températures à 2°C par rapport à l'époque préindustrielle, une réduction drastique des émissions de GES est nécessaire dans tous les domaines, y compris l'alimentation (**Figure 3**) (Dugast & Soyeux, 2019). Ainsi, dans la prochaine partie, nous allons étudier quels sont les changements alimentaires les plus pertinents pour mener vers une alimentation durable, c'est-à-dire saine, avec un faible impact environnemental, économiquement accessible et culturellement acceptable.

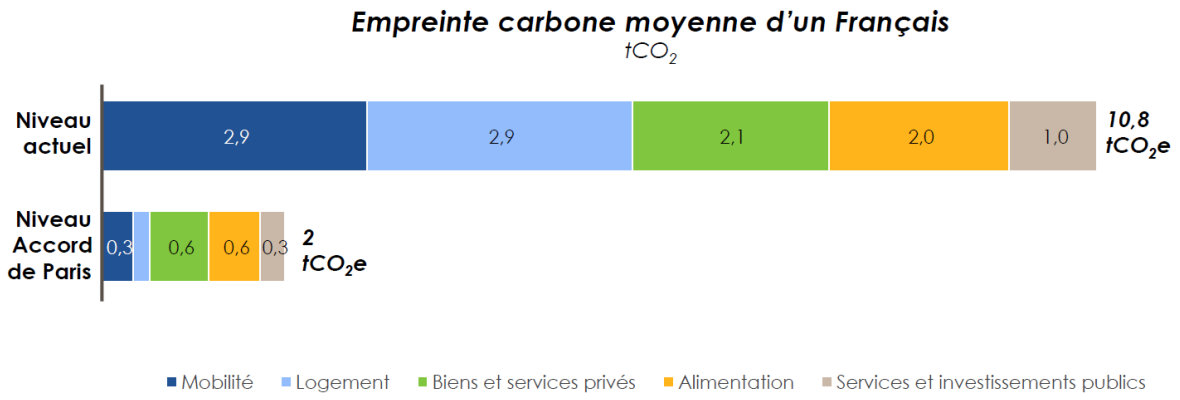


Figure 3 : Empreinte carbone moyenne par secteur d'un français en 2017 et niveau à atteindre afin de respecter les Accords de Paris (+2°C par rapport à l'époque préindustrielle) d'après les modélisations du cabinet Carbone 4 (extrait de Dugast & Soyeux, 2019)

1.2. Comment transformer les régimes alimentaires vers des régimes plus durables ?

Les changements alimentaires nécessaires pour définir des consommations alimentaires répondant aux différents critères de durabilité des régimes alimentaires ont été étudiés. Nous nous focaliserons essentiellement sur des études menées dans des populations adultes de pays occidentaux pour lesquels les schémas alimentaires sont assez similaires.

Identification d'un régime planétaire durable

La commission EAT-Lancet, réunissant 37 scientifiques de 16 pays, a proposé un régime alimentaire mondial de référence vers lequel il faudrait tendre pour atteindre des régimes alimentaires sains et durables (Willett et al., 2019). Ce régime est issu d'une analyse de la littérature scientifique et a été conçu pour pouvoir nourrir 10 milliards de personnes d'ici 2050 et permettre de réduire la mortalité attribuable à l'alimentation tout en assurant des apports nutritionnels adéquats et en limitant l'impact environnemental de la production alimentaire. Ce régime de référence est fortement végétalisé avec une consommation importante de fruits, légumes, céréales complètes, légumineuses, fruits à coque et huiles et une faible quantité de produits d'origine animale, de sucres ajoutés, céréales raffinées et tubercules (**Figure 4**). L'impact de ce régime sur différents critères environnementaux, définis comme étant les

limites planétaires (changement climatique, utilisation de l'eau, perturbations des cycles de l'azote et du phosphore, érosion de la biodiversité et changements d'utilisation des sols) a été évalué et montre que ce régime permettrait de réduire les pressions de la production agricole sur l'environnement, mais devrait être couplé à de meilleures pratiques de production et une réduction du gaspillage et pertes alimentaires pour atteindre des systèmes de productions durables et agir sur toutes les limites planétaires (Springmann et al., 2018; Willett et al., 2019).

	Régime de Référence (g/jour) (possible gamme)	**Consommation calorique (kcal/jour)**
Grains complètes		
Toutes grains	**232**	**811**
Tubercules/légumes féculents		
Pommes de terre, cassave	**50** (0 à 100)	**39**
Légumes		
Tous légumes	**300** (200 à 600)	**78**
Fruits		
Tous fruits	**200** (100 à 300)	**126**
Produit laitiers		
Produits laitiers	**250** (0 à 500)	**153**
Sources de protéines		
Bœuf, agneau, porc	**14** (0 à 28)	**30**
Poulet et autres volailles	**29** (0 à 58)	**62**
Œufs	**13** (0 à 25)	**19**
Poisson	**28** (0 à 100)	**40**
Haricots secs, lentilles, pois, soy	**75** (0 à 100)	**284**
Noix	**50** (0 à 75)	**291**
Graisses ajoutées		
Huiles insaturées	**40** (20 à 80)	**354**
Huiles saturées	**11.8** (0 à 11.8)	**96**
Sucres ajoutés		
Tous édulcorants	**31** (0 à 31)	**120**

Figure 4: Cibles scientifiques pour un régime alimentaire planétaire, avec des gammes possibles, pour un apport de 2500 kcal par jour (Willett et al., 2019)

Cependant, une étude a estimé que 1,58 milliards d'individus, principalement en Afrique sub-saharienne et en Asie du Sud, n'auraient pas les moyens d'adopter un tel régime étant donné qu'il est basé sur des aliments qui peuvent coûter cher, comme les fruits et légumes (Hirvonen et al., 2020). De plus, ce régime alimentaire ne serait peut-être pas culturellement acceptable dans tous les pays, critère pourtant essentiel dans la définition d'une alimentation durable et il faudrait adapter ces recommandations à chaque pays. En Italie et au Danemark, les recommandations de la commission EAT-Lancet ont été adaptées au contexte alimentaire du pays (disponibilité alimentaire, habitudes alimentaires) et il a été montré que ces régimes seraient adéquats sur le plan nutritionnel, à l'exception des apports en vitamine D dans les deux pays, en iode au Danemark et en calcium en Italie (Lassen et al., 2020; Tucci et al., 2021). Ainsi, pour mieux prendre en compte les spécificités d'un pays et définir des régimes alimentaires durables qui puissent être acceptables pour une population donnée, de nombreuses études ont modélisé des régimes alimentaires durables à partir des consommations alimentaires actuelles.

Modélisations de régimes alimentaires durables

Les différents critères d'une alimentation durable ne sont pas toujours compatibles entre eux. Il avait notamment été montré dans une étude de Vieux et al. que parmi les adultes de l'étude INCA2, les régimes les plus denses nutritionnellement étaient associés à des émissions de gaz à effet de serre plus important, à l'inverse des régimes denses énergétiquement (Vieux et al., 2013). Ainsi, un régime de bonne qualité nutritionnelle n'est pas nécessairement un régime avec un faible impact environnemental car cela dépend des aliments dont sont issus les nutriments contribuant à une bonne qualité nutritionnelle des régimes.

Ainsi, des méthodes d'optimisation ont été développées afin de modéliser des régimes en prenant en compte les différents critères de durabilité (Gazan et al., 2018). L'optimisation des régimes est une méthode qui permet d'identifier la meilleure combinaison de groupes d'aliments permettant de satisfaire un ou plusieurs objectifs (par exemple minimiser les émissions de GES et/ou le coût des régimes) tout en respectant un certain nombre de contraintes (par exemple assurer des apports satisfaisants en nutriments). L'acceptabilité culturelle des régimes est généralement prise en compte en cherchant à s'éloigner le moins possible du régime observé. L'optimisation permet ainsi d'identifier des régimes alimentaires prenant en compte les différents aspects de la durabilité (Gazan et al., 2018). D'après une revue de littérature sur 12 articles d'optimisation de régimes plus durable (Wilson et al., 2019), les études cherchent généralement à minimiser les émissions de GES tout en respectant des contraintes nutritionnelles, et parfois des contraintes d'acceptabilité (ex. minimum de déviation par rapport à l'observé) ou économiques. Les régimes modélisés sont systématiquement plus végétalisés, avec une moindre consommation de viande, particulièrement de ruminants, et parfois une diminution de la consommation de produits laitiers, produits sucrés/salés, boissons sucrées et alcoolisées (Wilson et al., 2019).

Certaines études prennent d'autres critères environnementaux que les seules émissions de GES. Dans une étude menée en France sur l'échantillon NutriNet-Santé, des régimes plus durables ont été modélisés en minimisant les impacts environnementaux (émissions de GES, demande énergétique, utilisation des sols), en maximisant la part de produits biologiques, et minimisant l'écart aux régimes observés, tout en assurant des apports nutritionnels adéquats et en contraignant les régimes en dessous d'un certain coût économique (Seconda, Fouillet, et al., 2021). Il a été montré que les impacts environnementaux des régimes pouvaient être réduit de 80% tout en augmentant de 26% le score PANDiet (mesurant l'adéquation aux recommandations nutritionnelles) par rapport aux régimes observés. Les régimes modélisés comprenaient une plus forte consommation de fruits, légumes, féculents et soja et une moindre consommation de viande, produits laitiers, œufs, plats composés, produits gras sucrés/salés. Des études ont également pris en compte les systèmes de co-production, entre la production de lait et de viande bovine par exemple, dans les modèles d'optimisation et ont montré que la prise en compte de ce critère entraîne une moindre réduction de la consommation de viande (Barré et al., 2018) ou une redistribution des consommations de viande associée à une forte réduction de la consommation de produits laitiers (Kesse-Guyot et al., 2021).

Cependant, la faible déviation aux régimes observés peut parfois limiter la réduction des émissions de GES. Une étude a modélisé des régimes alimentaires ayant des apports nutritionnels adéquats, un faible impact environnemental (57% d'émissions de GES en moins par rapport à 1990) et une faible déviation aux régimes observés au Royaume-Uni, en fonction du revenu des ménages (Reynolds et al., 2019). Les régimes modélisés avaient un coût plus faible que les régimes observés et, quel que soit le quintile initial de revenu du ménage, les

changements alimentaires allaient dans la même direction : plus de produits végétaux, moins de produits animaux (à l'exception du poisson), de boissons alcoolisées et de produits gras/sucrés. Cependant, il n'a pas été possible de modéliser des régimes réduisant de 80% les émissions de GES par rapport à 1990 car cela nécessitait de s'éloigner trop fortement des régimes observés (Reynolds et al., 2019). De même, dans une étude de modélisation de régimes durables dans différents pays européens (France, Royaume-Uni, Italie, Finlande et Suède) (Vieux et al., 2018), il était possible de réduire de 62%-78% (en fonction des pays et du sexe) les émissions de GES mais cela impliquait une forte déviation par rapport aux régimes observés.

Ainsi, les études de modélisation présentent l'avantage de pouvoir étudier simultanément plusieurs dimensions et de dessiner des trajectoires pour adopter des régimes durables. Cependant, les régimes modélisés ne seraient pas facilement transposables dans la réalité et ne représentent pas nécessairement le régime alimentaire que les individus adopteraient s'ils cherchaient à adopter un régime alimentaire durable. Ainsi, des études ont cherché à identifier des profils alimentaires durables déjà consommés par une partie de la population, ce qui pourrait les rendre plus facilement acceptable par le reste de la population.

Identifications de profils de consommation de régimes alimentaires durables

Une étude menée en France sur l'étude INCA2 par Masset et al. a identifié des régimes ayant à la fois une bonne qualité nutritionnelle (score PANDiet supérieur à la médiane de la population) et des faibles émissions de GES (émissions inférieures à la médiane de la population) (Masset et al., 2014). Ces régimes étaient consommés par 23% des hommes et 20% des femmes de l'échantillon INCA2 et contenaient moins de viande, œufs, charcuterie, fromage, boissons sucrées, alcoolisées et moins de produits gras/sucrés/salés et plus de fruits, légumes et fruits à coque par rapport au régime moyen. De plus, le coût des régimes était plus faible que le coût du régime moyen et les émissions de GES étaient 19% et 17% plus faible chez les hommes et les femmes par rapport au régime moyen (Masset et al., 2014). Deux études ont utilisé des modèles de régression à rang réduit (RRR) pour identifier des régimes répondant à plusieurs critères de durabilité des régimes (Heerschop et al., 2021; Seconda et al., 2018). L'étude de Heerschop et al. a été menée sur une population représentative de la population adulte néerlandaise (n=2078). Les auteurs ont cherché à identifier des profils de consommation alimentaires à la fois sains (évalué en utilisant le DHD15-index, score évaluant l'adhésion aux recommandations alimentaires néerlandaises) et avec un faible impact environnemental (évalué avec les émissions de GES et l'utilisation d'eau bleue). Ils ont montré qu'il existait un conflit entre ces différents indicateurs environnementaux mais que sur les trois profils identifiés, le profil « pauvre en viande », caractérisé par une faible consommation de viande, charcuterie, produits laitiers, légumes et une consommation plus importante de fruits à coque, graines et produits sucrés/salés, pouvait être considéré comme étant le plus durable. Les individus adhérant le plus à ce profil avait un DHD15-index 17,0% supérieur à l'ensemble de la population, des émissions de GES 19,6% inférieures mais une demande en eau bleue 7,7% supérieure (Heerschop et al., 2021). L'étude de Seconda et al. a été mené sur l'étude NutriNet-Santé (n=29 413) et a pris en compte huit critères de durabilité : environnementaux (émissions de GES, demande énergétique, utilisation des sols), santé (densité énergétique, score d'adéquation et de modération du score PANDiet, consommation de produits issus de l'agriculture biologique) et économique (part du budget des ménages dédié à l'alimentation) (Seconda et al., 2018). Un cluster représentant 23% de l'échantillon, a été identifié comme ayant le régime permettant le meilleur compromis entre ces

différents critères. Les individus inclus dans ce cluster consommaient moins de viande, de fromage et de produits gras/sucrés et plus de fruits, légumes, féculents, soja et produits céréaliers complets. Par rapport à l'ensemble de l'échantillon, les individus de ce cluster avaient une alimentation émettant 36% de GES en moins pour une demande énergétique inférieure de 19% et 33% en moins d'utilisation des sols, avec une consommation de produits issus de l'agriculture biologique 30% plus élevée. Sur les six profils étudiés dans cette étude, deux autres profils avaient un plus faible impact environnemental mais l'un de ces profils présentait une faible qualité nutritionnelle et l'autre des dépenses alimentaires plus élevées, ce qui souligne la difficulté d'identifier et de concevoir des régimes alimentaires à la fois sains, abordables et avec un faible impact environnemental.

Comme pour les études de modélisations, il apparaît que les régimes les plus durables sont ceux qui contiennent moins de produits animaux. Ainsi, l'impact environnemental de différents régimes alimentaires plus ou moins restrictifs sur la consommation de produits animaux a été étudié. Dans une revue de la littérature regroupant 63 études et compilant au total 210 scénarios de régimes alimentaires (Aleksandrowicz et al., 2016) il a été montré qu'adopter un régime végétalisé correspondait en moyenne à 22% en moins d'émissions de GES, 28% en moins d'utilisation des sols et 18% d'utilisation d'eau en moins par rapport aux régimes actuels. Plus le régime était végétalisé et excluait des produits animaux, plus les réductions d'impacts environnementaux étaient importantes (**Figure 5**). Une autre revue de la littérature de 21 études a comparé les émissions de GES et la qualité nutritionnelle des régimes de 66 régimes alimentaires de 12 pays différents (principalement Europe mais aussi Pérou, Inde, Etats-Unis et Nouvelle-Zélande) (González-García et al., 2018). Bien que les méthodes pouvaient différer entre les études, cette revue confirme que les régimes pauvres en aliments d'origine animale (régimes type méditerranéen ou végétariens) présentaient une moindre empreinte environnementale tout en ayant le meilleur profil nutritionnel que les régimes riches en viande, et plus précisément riches en viande de ruminant. A l'inverse, les régimes typiques d'Europe du Nord et de l'Ouest ou des Etats-Unis présentaient un impact environnemental plus important.

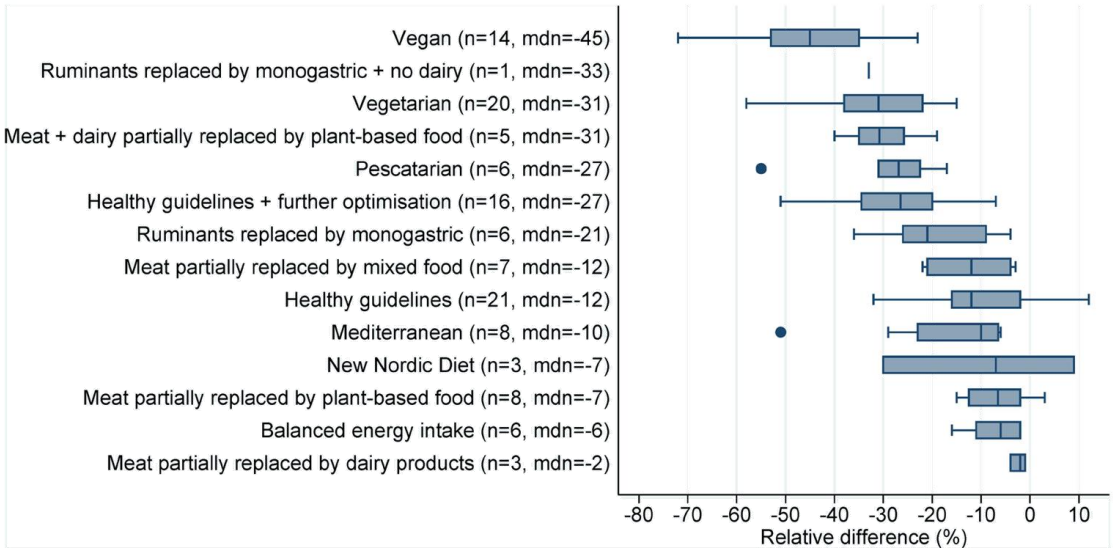


Figure 5 : Différences relatives d'émissions de GES (kgCO_2eq/hab/an) entre des régimes moyens actuels et différents régimes durables. n = nombre d'études, mdn = médiane (extrait de Aleksandrowicz et al., 2016)

En France, dans l'étude Nutrinet-Santé (n=29 210), les impacts environnementaux (émissions de GES, demande énergétique et utilisation des sols) et la consommation de produits biologiques de quatre régimes alimentaires (omnivore, pesco-végétarien, lacto-ovo-végétarien et végétalien) ont été étudiés (Rabès et al., 2020). Les lacto-ovo-végétariens avaient le coût des régimes le plus faible et les végétaliens le plus élevé et la consommation de produits biologiques était plus élevée à mesure que les régimes étaient plus végétalisés (67% de produits biologiques pour les végétaliens vs 28% pour les non-végétariens). Les émissions de GES étaient de 4,16 $kgCO_2eq/j$ pour les omnivores, 1,74 $kgCO_2eq/j$ pour les pesco-végétarien, 1,59 $kgCO_2eq/j$ pour les lacto-ovo-végétariens et 1,02 $kgCO_2eq/j$ pour les végétaliens (Rabès et al., 2020). Au Royaume-Uni, les émissions de GES des participants à la cohorte EPIC-Oxford (n=65 000) ont également été étudiées en fonction des régimes alimentaires (Scarborough, Appleby, et al., 2014). Les émissions de GES, standardisées pour un apport de 2000 kcal/jour, étaient les plus élevés pour les régimes omnivores : 7,19 $kgCO_2eq/j$ pour les forts consommateurs de viande (>100g/j), 5,63 $kgCO_2eq/j$ pour les consommateurs modérés (50-99g/j) et 4,67 $kgCO_2eq/j$ pour les faibles consommateurs de viande (<50g/j). Les régimes sans viande avaient des émissions plus faibles : 3,91 $kgCO_2eq/j$ pour les pesco-végétariens, 3,81 $kgCO_2eq/j$ pour les lacto-ovo-végétariens et 2,89 $kgCO_2eq/j$ pour les végétaliens. L'impact environnemental des régimes de 153 italiens a également été étudié en fonction du régime (omnivore, lacto-ovo-végétarien, végétalien) (Rosi et al., 2017). L'étude a montré un impact environnemental plus important des régimes omnivores, sur le plan des émissions de GES, de l'utilisation de l'eau et de l'utilisation des sols. En revanche, il existait une variabilité des impacts environnementaux entre les différents régimes et certains individus ayant des régimes lacto-ovo-végétariens ou végétaliens avaient des impacts environnementaux plus importants comparés à certains individus omnivores.

Pour conclure, nous avons vu que bien qu'il pouvait être difficile de concilier apports nutritionnels adéquats, faible impact environnemental, acceptabilité économique et culturelle, il était possible de modéliser et d'identifier des régimes alimentaires plus durables. Ces régimes sont plus végétalisés et contiennent des consommations bien plus faibles de produits animaux, sans nécessairement les exclure. Ces régimes durables contiennent aussi de moindre consommation de produits denses énergétiquement tels que les produits gras, sucrés ou salés et les boissons sucrées ou alcoolisées. L'enjeu est maintenant de rendre ces régimes alimentaires acceptables et adoptables par la plus grande partie de la population. Ainsi, dans la prochaine partie nous allons étudier quels sont les principaux freins et motivations à l'adoption de régimes durables.

1.3. Acceptabilité et adoption des régimes alimentaires végétalisés

Evolution de la consommation de produits animaux et de l'adoption de régimes végétalisés

Actuellement les aliments d'origine animale sont la principale source de protéines (environ les deux tiers) dans les pays développés (Halkjær et al., 2009; S. M. Phillips et al., 2015; Wu et al., 2014). Dans les pays Européens, on constate notamment que la consommation de protéines animales a augmenté sur la période 1961-2001 alors que la consommation de protéines végétales a peu évolué (de Boer et al., 2006). Cependant, il semblerait que depuis plusieurs années, la consommation de viande tende à se stabiliser, voire diminuer dans les

pays développés (Godfray et al., 2018). En France plus particulièrement, la consommation de viande a continuellement augmenté depuis l'après-guerre jusqu'à atteindre un pic de consommation en 1998 (94kg d'équivalent carcasse/habitant/an) (FranceAgriMer, 2020). Depuis, cette consommation diminue et s'établit en 2019 à 85,3kg d'équivalent carcasse/habitant/an. On remarque également une évolution des consommations par type de viande avec une baisse de la consommation de viande de porc et de viande bovine et une augmentation de la consommation de volaille (FranceAgriMer, 2020) (**Figure 6**). De même, au moyen des enquêtes sur les Comportements et consommations alimentaires en France (CCAF), le CRÉDOC a estimé que la consommation de viande, tout type, a baissé de 12% en 10 ans, passant de 153 g/jour en 2007 à 135 g/jour en 2016 (Tavoularis & Sauvage, 2018).

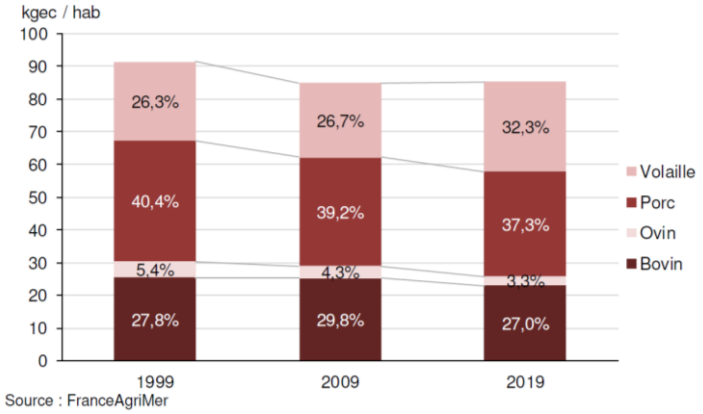


Figure 6: Consommation individuelle française des viandes : comparaison de la structure entre 1999, 2009 et 2019 (extrait de FranceAgriMer, 2020)

Ces évolutions de consommations convergent avec une volonté des consommateurs adultes de réduire leur consommation de viande. En France, selon une enquête menée en 2017 sur un panel de 12 000 français du Kantar Worldpanel (Kantar WorldPanel, 2017) 34% des ménages déclaraient avoir dans leur foyer au moins une personne qui tend à réduire ou limiter sa consommation de protéines animales (vs 25% en 2015). Aux Pays-Bas, deux sondages en ligne menés sur deux populations représentatives de la population néerlandaises en 2009 (n=800) et 2011 (n=1253), ont montré que le pourcentage d'individus consommant de la viande tous les jours aux repas principaux est passé de 26,7% en 2009 à 18,4% en 2011 (Dagevos, 2014). Sur l'enquête de 2011, 29,7% des participants ont déclaré que leur consommation de viande avait diminué par rapport à l'année passée et 27,1% ont déclaré avoir l'intention de réduire leur consommation de viande dans l'année à venir. En Angleterre, selon l'étude British Social Attitudes (BSA) (2014, n=2878), 29% des individus déclaraient avoir réduit leur consommation de viande par rapport à il y a un an, 9% avaient consommé la même quantité mais envisageait de réduire leur consommation et 6% avaient arrêté de consommer de la viande (L. Lee & Simpson, 2016). De même aux Etats-Unis, selon un sondage en ligne mené en 2015 sur 1112 adultes représentatifs de la population américaine (Neff et al., 2018), 55% des participants déclaraient avoir réduit leur consommation de charcuterie et 41% la consommation de viande rouge par rapport à il y a trois ans, mais parmi eux, 37% ont déclaré avoir augmenté la consommation de volaille ou de poisson en parallèle.

En revanche, si environ un tiers des participants aux études déclarent réduire leur consommation de viande, le pourcentage de personnes suivant des régimes végétariens reste relativement faible et dépasse rarement les 10% dans les populations occidentales (Mathieu & Dorard, 2016). En France, dans l'étude INCA3, 1,8% des adultes se déclaraient végétariens

(Anses, 2017). Dans une étude menée en ligne en 2018 sur 4 populations représentatives de pays européens, 5.6% des participants se sont déclarés végétariens (8% au Royaume-Uni, 5,6% en Allemagne, 5,2% en France et 2,8% en Espagne) (FranceAgriMer, 2019). En revanche, les participants étaient plus nombreux à se déclarer flexitariens (défini dans l'étude comme un individu limitant sa consommation de viande, pour des raisons autres que financière, sans totalement l'exclure) : 26% en Allemagne, 23% en Espagne, 20% en France et 19% au Royaume-Uni. Dans une enquête IFOP pour FranceAgriMer menée en 2020 sur 15 001 individus représentatifs de la population française, 24% des participants se déclaraient flexitariens alors que seulement 2,2% déclaraient suivre un régime sans viande (**Figure 7**) (Crouzet et al., 2021). Cependant, il faut noter que le régime déclaré ne correspond pas toujours aux pratiques alimentaires et que la consommation de viande peut toujours être élevée chez ceux qui déclarent réduire leur consommation (Crouzet et al., 2021; FranceAgriMer, 2019).

Figure 7: Répartition des individus de l'enquête IFOP/FranceAgriMer 2020 en fonction de leur régime alimentaire déclaré, couplé à leur consommation de viande déclarée (extrait de Crouzet et al., 2021)

Ainsi, la tendance semble plus être à la réduction de la consommation de viande, et à la substitution entre les types de viande, plutôt qu'à l'arrêt total de sa consommation. Cette tendance peut notamment s'expliquer par les motivations sous-jacentes à l'arrêt/diminution de la consommation de viande.

<u>Les motivations à réduire sa consommation de viande</u>

Les individus justifient généralement leur volonté de réduire, ou arrêter, la consommation de viande par rapport à des préoccupations de santé, de bien-être animal, ou d'environnement, ou simplement de préférence alimentaire (Niva et al., 2017). La santé est généralement la principale raison justifiant la diminution de la consommation de viande, plus particulièrement parmi les adultes plus âgés (FranceAgriMer, 2019; L. Lee & Simpson, 2016; Neff et al., 2018), suivie par le bien-être animal, le refus des conditions d'élevage ou de l'exploitation des animaux (FranceAgriMer, 2019; L. Lee & Simpson, 2016).

Il semblerait cependant que les motivations diffèrent en fonction du type de régime adopté, et que les personnes suivant un régime exclusif (lacto-ovo-végétarien, végétalien) aient plus des motivations d'ordre éthique alors que les individus adoptant des régimes végétalisés non exclusifs le fassent plus pour des raisons de santé (de Gavelle et al., 2019; Mathieu & Dorard, 2016; Miki et al., 2020; Niva et al., 2017). Ainsi, dans l'étude menée sur les quatre populations

européennes, les végétariens citaient principalement comme motivations la cruauté d'élever des animaux pour les tuer (74% des participants) et les mauvaises conditions d'élevages (53%) plutôt que le fait que manger moins de viande est meilleur pour la santé (26%) (**Figure 8**). A l'inverse, les flexitariens citaient prioritairement la santé comme motivation (69% des répondants contre 31% pour la cruauté de l'élevage et 55% pour les conditions d'élevage) (FranceAgriMer, 2019). Ainsi, il semblerait qu'il y ait une distinction entre ceux réduisant leur consommation de viande principalement pour les bénéfices attendues sur leur bien-être personnel et ceux qui réduisent ou arrêtent la consommation de viande pour des considérations plus philosophiques et un engagement plus fort que leur seul intérêt personnel (Crouzet et al., 2021; Mathieu & Dorard, 2016).

Végétariens déclarés consommant peu ou pas de viande
(n=97)

	en 1er	en 2ème	en 3ème	Total
C'est cruel d'élever les animaux pour les tuer	49%	16%	9%	74%
A cause des conditions d'élevage	12%	29%	12%	53%
J'éprouve du dégoût pour la viande	10%	19%	16%	45%
C'est mauvais pour l'environnement	8%	18%	18%	44%
Il vaut mieux manger moins de viande pour être en bonne santé	3%	2%	21%	26%
Je n'aime pas le goût de la viande	8%	3%	5%	16%
Pour maigrir	1%	5%	1%	7%
Son prix est trop élevé	1%	2%	4%	7%
Je n'ai pas confiance dans la fraîcheur des produits	1%	1%	1%	3%
C'est difficile à conserver	0%	0%	1%	1%
C'est trop long à préparer	0%	1%	0%	1%
Autre raison	6%	3%	3%	12%

Flexitariens déclarés consommant peu ou pas de viande
(n=152)

	en 1er	en 2ème	en 3ème	Total
Il vaut mieux manger moins de viande pour être en bonne santé	33%	17%	18%	69%
A cause des conditions d'élevage	17%	22%	16%	55%
C'est mauvais pour l'environnement	11%	13%	8%	33%
C'est cruel d'élever les animaux pour les tuer	12%	9%	11%	31%
Je n'aime pas le goût de la viande	6%	8%	4%	19%
J'éprouve du dégoût pour la viande	3%	9%	3%	16%
Pour maigrir	5%	5%	3%	12%
Son prix est trop élevé	4%	2%	6%	12%
C'est trop long à préparer	3%	2%	6%	11%
Je n'ai pas confiance dans la fraîcheur des produits	1%	4%	3%	8%
C'est difficile à conserver	0%	1%	1%	3%
Autre raison	5%	2%	3%	9%

Pour quelles raisons, mangez-vous peu ou pas de viande ?
- En % - Base : individus consommant pas/peu de viande (tous pays confondus, bases entre parenthèses)

Source : Enquête CREDOC pour FranceAgriMer et l'OCHA

Figure 8: Les motivations de la faible consommation ou de la non-consommation de viande chez les végétariens (dont végétaliens) et flexitariens déclarés (extrait de FranceAgriMer, 2019)

Bien que l'environnement fasse parti des motivations exprimées par les individus réduisant ou arrêtant leur consommation de viande (FranceAgriMer, 2019; L. Lee & Simpson, 2016), cette préoccupation semble plus secondaire que la santé ou le bien-être animal (Sanchez-Sabate & Sabaté, 2019). Il semblerait que les consommateurs aient peu conscience de l'impact environnemental de la consommation de viande (et de l'alimentation en général)(Niva et al., 2017; Sanchez-Sabate & Sabaté, 2019), et auraient tendance à sous-estimer cet impact, notamment par rapport à d'autres secteurs, comme les transports par exemple (Sanchez-Sabate & Sabaté, 2019). Réduire sa consommation de viande est ainsi une des options les moins envisagées pour réduire son empreinte environnementale (Sanchez-Sabate & Sabaté, 2019). Or, selon le cabinet de conseil Carbone 4, adopter un régime végétarien serait la mesure individuelle la plus efficace pour réduire son empreinte carbone (Dugast & Soyeux, 2019). Cependant, dans une étude évaluant les actions que seraient prêts à faire 308 ménages de quatre villes moyennes en France, Allemagne, Norvège et Suède pour réduire leur empreinte carbone, il a été montré que les actions avec le plus fort potentiel de réduction de l'empreinte carbone étaient les actions les moins choisies (Sköld et al., 2018). Les participants choisissaient préférentiellement des actions modifiant peu leurs habitudes et qui ne nécessitaient pas de renoncer à leur mode de vie.

Finalement, parmi les individus réduisant leur consommation de viande, une certaine proportion vont le faire plus par contrainte économique que par volonté, notamment parmi les individus les moins aisés (FranceAgriMer, 2019; L. Lee & Simpson, 2016, 2016; Neff et al., 2018). Ces individus ne se déclarent d'ailleurs pas comme flexitarien mais comme omnivore, avec une réduction de consommation de viande qui se fait de manière contrainte (Crouzet et al., 2021).

Bien que ces études ont montré qu'une partie de la population semblait réduire ou vouloir réduire sa consommation de viande, cela ne représente pas la majorité des consommateurs. Ainsi, il est intéressant d'étudier quels sont les freins à l'adoption d'un régime végétalisé et à la réduction de la consommation de viande.

Les freins à l'adoption d'un régime plus végétalisé

Les individus sont souvent réticents à réduire leur consommation de viande, du fait d'un fort attachement à la viande dans nos sociétés et de la place qu'elle occupe dans la structure de nos assiettes (Schösler et al., 2012). L'attachement à la viande semble se justifier principalement par quatre arguments : la nécessité (il faut manger de la viande pour être en forme), le naturel (c'est dans notre nature de manger de la viande), le goût (le plaisir de manger de la viande) et le conformisme (tout le monde mange de la viande) (Piazza et al., 2015). La perception que la consommation de viande est un caractère masculin peut également justifier cet attachement (Schösler et al., 2015).

Plusieurs études ont montré que les individus ne voulant pas réduire leur consommation de viande le justifiait principalement par le fait qu'un régime alimentaire équilibré doit contenir de la viande et qu'un repas ne peut pas être complet s'il ne contient pas de viande (Malek et al., 2019; Neff et al., 2018). Dans une étude menée aux Pays-Bas (2013, n=357 néerlandais natifs et n=350 néerlandais issus de l'immigration chinoise) (de Boer et al., 2017), l'appréciation de la viande, la perception que la consommation fréquente de viande est meilleure pour la santé et le fait que la consommation de viande fait partie des habitudes alimentaires faisaient parties des principales raisons citées pour justifier la consommation fréquente de viande. Plus particulièrement, l'appréciation de viande était le principal argument donné par les gros consommateurs de viande (>150g/j) (67% des répondants). Dans cette étude, il a également été constaté que les individus ayant une consommation faible (<50g/j) ou modérée (50-99g/j) de viande donnaient l'argument de santé à la fois comme raison de consommer fréquemment de la viande mais également comme argument pour ne pas en consommer trop fréquemment (de Boer et al., 2017). Parmi les omnivores déclarés de l'enquête IFOP pour FranceAgriMer, 96% déclaraient aimer la viande, 88% estimaient que la viande est nécessaire pour la santé et 73% estimaient qu'un repas avec viande est plus convivial qu'un repas sans viande (Crouzet et al., 2021). L'appréciation de la viande était la raison donnée par 61% des omnivores, mais également 40% des flexitariens, pour ne pas souhaiter devenir végétarien. Il est intéressant de noter dans cette étude que les omnivores avaient moins tendance que le reste des participants à suivre une alimentation plus responsable (privilégier le local, les fruits et légumes de saison, les labels de qualité, …) et à se sentir responsable/acteur vis-à-vis du réchauffement climatique (Crouzet et al., 2021). Ainsi, on peut penser que la consommation de viande est principalement justifiée par l'appréciation et la perception de sa nécessité pour être en bonne santé et que ceux qui consomment régulièrement de viande se sentent moins impliqués dans les enjeux liés au bien-être animal et au réchauffement climatique.

En plus de l'attachement à la viande, une autre barrière à l'adoption de régimes plus végétalisés semble être la difficulté de remplacer la viande par des aliments d'origine végétale. Une étude menée aux Pays-Bas (2010, n=1083) a notamment montré que les participants choisissaient préférentiellement des produits animaux (poisson, œuf, fromage) pour remplacer la viande plutôt que des produits végétaux (Schösler et al., 2012). Les intentions, barrières et bénéfices perçus à adopter un régime végétalisé ont été étudiés en 2014 sur un panel de 214 australiens (Lea et al., 2006). Selon les participants, adopter un régime végétalisé permettrait de consommer moins d'acides gras saturés (79% des participants), de manger plus de fibres (76%) et de prévenir les maladies (70%). Cependant, les participants identifiaient également des barrières à adopter un régime végétalisé comme le manque d'information sur les régimes végétalisés (42% des participants), ne pas avoir envie de changer ses habitudes alimentaires (30% des participants) et que le reste de sa famille ne voudrait pas suivre un régime végétalisé (25%). Le manque de disponibilité d'options végétariennes lors de repas à l'extérieur était également identifié comme une barrière. Dans l'enquête IFOP pour FranceAgriMer, les principales difficultés rencontrées par les flexitariens étaient la difficulté à trouver des idées de menus, à savoir comment remplacer les protéines animales, à se priver de certains aliments et à avoir un budget courses plus élevé qu'auparavant (Crouzet et al., 2021)

La consommation de légumineuses comme sources de protéines végétales est souvent encouragée, cependant leur consommation reste faible. En France, dans l'étude INCA3, seuls 15% des adultes ont déclaré une consommation de légumineuses sur les 3 jours de recueils alimentaires (Anses, 2017). En effet, bien que les légumineuses soient généralement perçues comme étant bonnes pour la santé, les consommateurs leur montrent peu d'intérêt, notamment parce qu'elles ne font pas partie des habitudes alimentaires, que les consommateurs ne savent pas toujours comment les cuisiner et vont craindre d'avoir des problèmes digestifs en les consommant (Niva et al., 2017). Sur un sondage mené en ligne en Australie (2018, n=505), les participants ne consommant pas de légumineuses évoquaient comme barrières le goût, le manque de connaissance et compétence pour les cuisiner et les inclure dans un repas, ainsi que le temps nécessaire pour les préparer (Figueira et al., 2019).

Ainsi, nous avons vu que les principaux freins liés à l'adoption de régimes végétalisés étaient liés à l'attachement à la viande, à la difficulté de changer ses habitudes alimentaires et aux manques de connaissances sur la cuisine végétale. Il existe cependant des solutions qui peuvent être mises en place pour promouvoir la réduction de la consommation de viande et encourager la consommation d'aliments végétaux, comme l'information aux consommateurs (Harguess et al., 2020), la réduction des tailles de portions ou la promotion des repas sans viande (de Boer et al., 2014), ou l'augmentation de la disponibilité et la visibilités des produits et plats végétariens, en restauration collective notamment (Garnett et al., 2019). Nous aborderons dans la partie III le rôle que peuvent jouer les substituts de viande et de produits laitiers dans l'adoption de régimes plus durables. Nous avons également vu dans cette partie que la santé était à la fois un moteur pour réduire sa consommation de viande, mais pouvait également être un frein, avec des craintes qu'un régime moins carné ne soit pas équilibré. Ainsi, dans la prochaine partie, nous allons étudier les relations entre la consommation d'aliments sources de protéines et la santé, et entre les types de régimes alimentaires et la santé.

Messages clés de la première partie de l'introduction

- L'OMS défini les régimes alimentaires durables comme des régimes sains, avec un faible impact environnemental, économiquement accessibles et culturellement acceptable. Or, plusieurs éléments montrent que les régimes alimentaires actuels ne sont pas durables.
- Dans le monde, 11 millions de morts prématurées sont attribuables à l'alimentation et la prévalence de l'obésité est en augmentation : en 2014, 11% des hommes et 15% des femmes étaient obèses. A l'opposé, 5,9% de la population mondiale souffre de la faim et 3 milliards d'individus n'ont pas les moyens d'avoir une alimentation saine.
- L'alimentation est responsable d'environ 1 / 4 des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES). L'élevage est le principal contributeur aux émissions de GES et nécessite également une utilisation importante des sols agricoles et des ressources en eau.
- Afin de limiter les impacts du réchauffement climatique, les émissions de GES de tous les secteurs doivent être réduites, dont celles liées à l'alimentation.
- Plusieurs études montrent qu'il est possible de rendre les régimes plus durables en réduisant l'impact environnemental de l'alimentation tout en garantissant des apports nutritionnels adéquats.
- Ces régimes plus durables se caractérisent par des consommations plus faibles de produits animaux et de produits denses énergétiquement (produits gras/salés/sucrés, boissons sucrées/alcoolisées) et des consommations plus importantes de produits végétaux (légumes, fruits, céréales complètes, …).
- Dans certains pays, environ 1 / 3 de la population exprime une volonté de réduire sa consommation de viande, mais seulement une faible proportion adopte des régimes végétariens (environ 2% en France).
- Le bien-être animal et la santé sont les principales motivations à la diminution/arrêt de la consommation de viande. Les raisons environnementales semblent moins présentes, probablement du fait d'une moindre conscience de l'impact environnemental de l'alimentation.
- Il existe des freins à la réduction de la consommation de viande : appréciation de la viande, habitudes alimentaires, importance perçue de la viande pour être en bonne santé ou pour la structure des repas.
- Il existe aussi des freins à consommer plus de produits végétaux : manque de connaissance et compétence sur la cuisine végétale, habitudes alimentaires, manque de disponibilité des produits/plats sans viande.

2. Régime végétalisés, apports nutritionnels et santé

2.1. Type de protéines, qualité de l'alimentation et santé

Aliments sources de protéines animales/végétales vecteurs de différents nutriments

Les aliments sources de protéines peuvent être d'origine animale (viande, poisson, produit laitier, œuf) ou végétale (légumineuses, fruits à coque, graines, céréales) et ont un rôle primordial pour notre santé. Tout d'abord, ils permettent de fournir des protéines alimentaires, dont le rôle est de fournir de l'azote et des acides aminés au corps humain pour qu'il puisse assurer sa synthèse protéique (Mariotti, 2017; WHO/FAO/UNU, 2007). Le besoin nutritionnel moyen (BNM) en protéines d'un adulte est estimé à 0,66 g/kg de poids corporel et la référence nutritionnelle pour la population (RNP) à 0,83 g/kg de poids corporel (Anses, 2016e; WHO/FAO/UNU, 2007) et les protéines devraient fournir entre 10 et 20% de l'apport énergétique total (Anses, 2016e). En plus de la quantité de protéines ingérée, la qualité des protéines est importante pour assurer des apports suffisants. Deux critères sont couramment utilisés pour évaluer la qualité d'une protéine, par rapport à sa fonction primaire : sa digestibilité et sa teneur en acides aminés indispensables (Anses, 2016e; Mariotti, 2017; WHO/FAO/UNU, 2007). Les protéines végétales sont généralement moins digestibles que les protéines animales, mais les différences sont relativement faibles : si l'on considère les mesures de digestibilité iléale réelle, la protéine de lait est celle ayant la meilleure digestibilité (95%), les autres protéines animales ont une digestibilité de 90-94% et les protéines végétales de 89-92% (Mariotti, 2017). La qualité d'une protéine dépend également de sa composition en acides aminés indispensables (AAI), qui doivent être fournis en quantité suffisante pour assurer la synthèse protéique (Anses, 2016e; Mariotti, 2017). Il y a neuf AAI : le tryptophane, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, la valine, la leucine, l'isoleucine et l'histidine. Alors que les protéines animales apportent en quantité suffisante les AAI, les protéines de céréales sont déficientes en lysine et les protéines de légumineuses sont très légèrement déficientes en acides aminés soufrés (méthionine et cystéine)(Anses, 2016e; Mariotti, 2017). Cependant, en combinant la consommation de céréales et légumineuses il est possible d'avoir un apport complet en acides aminés (Mariotti, 2017; Wu et al., 2014).

Ainsi, dans les pays en voie de développement où les quantités de protéines consommées sont généralement faibles, avec un ratio protéines/énergie insuffisant, et où les régimes alimentaires sont principalement basés sur des céréales ou des tubercules, la qualité des protéines est un enjeu primordial pour assurer des apports adéquats (Ghosh et al., 2012; Mariotti, 2017). En revanche, dans les pays développés, les apports en protéines sont généralement supérieurs aux besoins, y compris chez les individus suivant des régimes végétariens, et par conséquent la qualité des protéines serait un enjeu moins primordial (Mariotti, 2017; Mariotti & Gardner, 2019). Dans l'étude EPIC (10 pays européens, 1995-2000, n=36 034), les apports moyens en protéines variaient entre 0,91 et 1,83 g/kg de poids corporel en fonction des pays (Halkjær et al., 2009). Dans la cohorte EPIC-Oxford (n=30 251), les apports en protéines étaient estimés à 1,28 g/kg de poids corporel pour les individus non-végétariens et à 0,99 g/kg de poids corporel pour les végétaliens (Sobiecki et al., 2016). La prévalence d'inadéquation en protéines était toutefois plus élevée pour les végétaliens (16,5% pour les hommes, 8,1% pour les femmes) que pour les non-végétariens (2,5% pour les hommes, 1,2% pour les femmes) (Sobiecki et al., 2016). A partir de l'étude INCA2 (2006-2007, n=1678), il a cependant été montré en simulant la substitution de protéines animales par des protéines végétales, qu'il était possible de conserver des apports adéquats en protéines et en

AAI en introduisant la consommation de légumineuses, fruits à coque et graines dans des régimes alimentaires comprenant des pourcentages élevés de protéines végétales (de Gavelle et al., 2017).

Le rôle des aliments sources de protéines n'est pas uniquement d'apporter des protéines mais également un ensemble de nutriments qui composent ces aliments. Bien que les aliments sources de protéines végétales contiennent généralement moins de protéines que les aliments sources de protéines animales, ils contiennent également moins d'acides gras saturés, et peuvent contenir des quantités comparable en fer et zinc, bien que ces nutriments soient généralement moins bien absorbés lorsqu'ils sont issus des produits végétaux (Bohrer, 2017). A partir des données de l'étude NHANES (2007-2010, n=11 296), Phillips et al. ont montré que les aliments sources de protéines animales et végétales contribuaient différemment aux apports en nutriments (**Figure 9**)(S. M. Phillips et al., 2015). Ainsi, la viande contribuait principalement aux apports en zinc, vitamine B12 et protéines et les produits laitiers contribuaient principalement aux apports en vitamine D, calcium, vitamine B12, vitamine A et phosphore. A l'inverse, les aliments sources de protéines végétales tels que les légumineuses et fruits à coque contribuaient plutôt aux apports en vitamine E, fibres, acides gras polyinsaturés et magnésium et le pain contribuait plus aux apports en vitamines B1, B9, fer et fibres (S. M. Phillips et al., 2015).

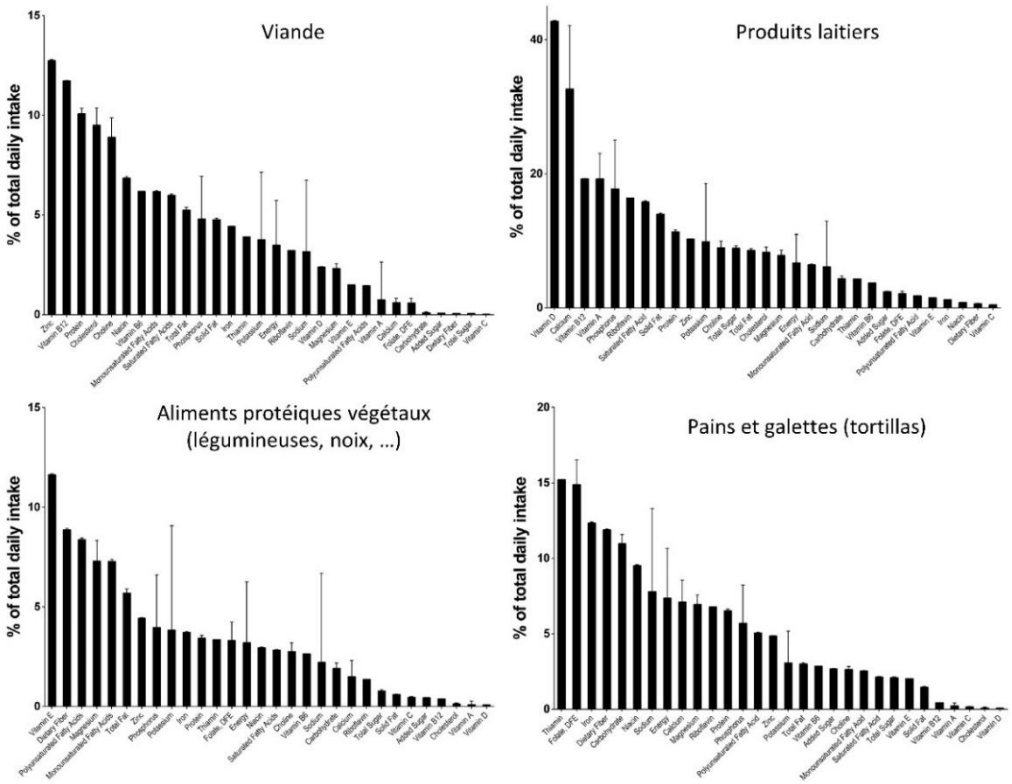


Figure 9: Contribution de la viande, des produits laitiers, des aliments protéiques végétaux et des pains aux apports nutritionnels dans l'étude NHANES (2007-2010, n= 11 296) (adapté de S. M. Phillips et al., 2015)

Ainsi, les apports en protéines animales et végétales contribuent différemment aux apports en nutriments. Camilleri et al. ont montré à partir de l'étude INCA2 (2006-2007, n=1912) que le PANDiet était associé à la consommation de protéines végétales (β=0,50, P<0,0001) mais pas à la consommation de protéines animales dans la population générale adulte (Camilleri et al.,

2013). En revanche, la consommation de protéines animales était associée au PANDiet chez les femmes (β=0,08, P<0,0001) et inversement associée chez les hommes (β=-0,05, P<0,01). Cependant, les associations variaient en fonction de la nature des protéines animales. La consommation de protéines de poisson, lait et yaourt était associée au PANDiet alors que le PANDiet était inversement associé à la consommation de viande transformée, fromage, œuf, abats pour les deux sexes, et à la consommation de viande rouge et volaille chez les hommes. Quel que soit la nature des protéines végétales (céréales, légumineuses, fruits à coque et graines), leur consommation était positivement associée au PANDiet. Ainsi, la qualité de l'alimentation semblerait dépendre de la consommation de protéines animales et végétales, mais également de la nature des protéines animales. A partir de l'étude INCA2 (2006-2007, n=1678), huit profils de consommations basés sur les apports en protéines de différents groupes alimentaires ont été identifiés (de Gavelle et al., 2018). Les individus identifiés comme « consommateurs de poisson » et « consommateurs de lait » avaient le PANDiet le plus élevé alors que ceux identifiés comme « consommateurs de porc » et « consommateurs de plats à emporter » (pizzas, sandwichs, …) avaient le PANDiet le plus faible. Le profil d'adéquation en nutriments variait en fonction du profil de consommation, ce qui peut s'expliquer par les principaux groupes alimentaires définissant le profil. Ainsi, les « consommateurs de poisson » avaient des probabilités d'adéquation plus élevées pour les acides gras EPA et DHA, les « consommateurs de lait » des probabilités plus élevées pour l'iode et le calcium et les « consommateurs de bœuf » des probabilités plus élevées pour le fer et le zinc (de Gavelle et al., 2018).

Ainsi, la consommation de protéines animales et végétales et la consommation d'aliments sources de protéines semble associée aux apports en nutriments et à la qualité de l'alimentation, évaluée par l'adéquation des apports en nutriments. De même, il a été montré que leur consommation était différemment associée au risque de maladies non-transmissibles.

Associations entre la consommation et la nature des protéines et la santé

Plusieurs études se sont intéressées aux associations entre la consommation de protéines ou d'aliment riches en protéines et le risque ou la mortalité de maladies non-transmissibles chez les adultes. En effet, sur la base d'études épidémiologiques, l'Anses a estimé que la consommation de viande hors volaille et de viande transformée augmentait le risque de cancer colorectal, de maladies cardio-vasculaires et de diabètes de type 2 alors que la consommation de produits végétaux (fruits, légumes, produits céréaliers complets) réduirait le risque de maladies cardiovasculaires, de diabète de type 2 et de cancer colorectal (Anses, 2016b). Pour les autres aliments sources de protéines, les associations sont plus contrastées. Ainsi, la consommation de produits laitiers serait associée à une diminution du risque de cancer colorectal, de diabète de type 2 et de maladies cardiovasculaires mais à une augmentation du risque de cancer de la prostate. La consommation de poisson diminuerait le risque de maladies cardiovasculaire et le risque de démence mais les associations avec le risque de diabète de type 2 diffèrent en fonction des pays (Anses, 2016b).

Tian et al. ont mené une méta-analyse sur 11 études de cohortes ayant étudié les relations entre consommation de protéines et risque de diabète de type 2 (Tian et al., 2017). La consommation de protéines totales et animales était associée à un risque plus élevé de diabète de respectivement 12% [95%CI 1,08-1,17] et 14% [95%CI 1,09-1,19]. La consommation de protéines végétales était associée à un risque réduit de diabète uniquement chez les femmes (Risque relatif (RR) : 0,92 [95%CI 0,86-0,98]). En analysant en fonction des sources de protéines, il ressort que la consommation de viande rouge (RR : 1,22 [95%CI 1,09-

1,36]) et viande transformée (RR : 1,39 [95%CI 1,29-1,49]) était associée à un risque plus élevé de diabète alors que la consommation de produits laitiers était associée à un risque réduit (RR : 0,89 [95%CI 0,84-0,94]), de même que la consommation de soja chez les femmes (RR : 0,74 [95%CI 0,59-0,93]) (Tian et al., 2017). Malik et al. ont également montré à partir de 3 cohortes américaines (Nurses' Health Study (NHS), n=72 992, Nurses' Health Study 2 (NHS2), n=92 088, Health Professionals Follow-up Study (HPFS), n=40 722) que la substitution d'une portion par jour d'aliments d'origine animale, de céréales raffinées ou de pomme de terre par une portion d'aliments sources de protéines végétales (céréales complètes, légumineuses, fruits à coque) était associée à une réduction du risque de diabète de 6% (substitution des céréales raffinées) à 21% (substitution de la viande transformée) (**Figure 10**) (Malik et al., 2016).

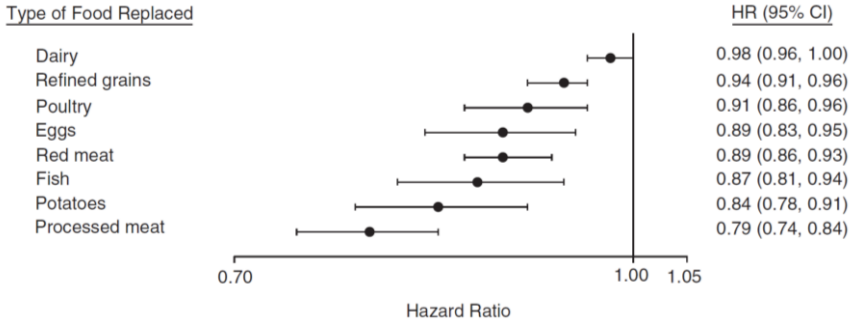


Figure 10: Hazard ratios (HR) et intervalles de confiance à 95% (CI) pour le risque de diabète de type 2 associé à la substitution d'une portion d'aliments protéiques animaux (produits laitiers, volaille, œuf, viande rouge, poisson ou viande transformée), de céréales raffinées ou de pomme de terre par une portion d'aliments protéiques végétaux (variable composite comprenant des céréales complètes, légumineuses, cacahuètes, beurre de cacahuètes et fruits à coque) dans les cohortes NHS (n=72 992), NHS2 (n=92 088) et HPFS (n=40 722) (extrait de Malik et al., 2016).

Plusieurs études ont également étudié les associations entre la consommation de protéines et la mortalité. Une étude incluant 6 cohortes prospectives menées au Etats-Unis a étudié les associations entre la consommation de viande transformée, viande rouge, volaille et poisson et la mortalité chez 29 682 participants suivis jusqu'en 2016 et dont les données alimentaires ont été collectées entre 1985 et 2002 en fonction des cohortes (Zhong et al., 2020). Il a été montré que la consommation supplémentaire de 2 portions par semaine de viande transformée, viande rouge ou de volaille, mais pas celle de poisson, était associée à un risque plus élevé de maladie cardiovasculaires de respectivement 7% [95%CI 1,04-1,11], 3% [95%CI 1,01-1,06] et 4% [95%CI 1,01-1,06]. Les consommations de viande transformée et viande rouge était également associées à un risque plus élevé de mortalité toute cause, de respectivement 3% [95%CI 1,02-1,05] et 3% [95%CI 1,01-1,05] (Zhong et al., 2020). Les associations entre les profils de consommation protéique et la mortalité cardiovasculaire ont été étudiées dans la cohorte Adventist Health Study-2 (AHS-2, période de suivi 2002-2007, n= 81 337) (Tharrey et al., 2018). Après ajustement sur les facteurs associés au mode de vie, les individus adhérant le plus (5ème quintile) au profil de consommation protéique « viande » (principalement composé par la viande rouge, charcuterie, volaille), avait un risque de mortalité cardiovasculaire plus élevé de 61% [98,75%CI 1,12-2,32] par rapport au 1er quintile. À l'inverse, les individus adhérant le plus au profil de consommation protéique « fruits à coque et graines » (cacahuètes, fruits à coque, graines) avait un risque réduit de 40% [98,75%CI

0,42- 0,86] de mortalité cardiovasculaire par rapport au 1er quintile. La consommation de protéines animales était également associée à un risque plus élevé de mortalité cardiovasculaire (HR : 1,12 [95%CI 1,05-1,19], pour une consommation supplémentaire de 18g de protéines animales) mais pas la consommation de protéines végétales (HR 0,95 [95%CI 0,89-1,02]) (Tharrey et al., 2018).

Une étude prospective menée aux Etats-Unis sur 131 342 participants de la Nurses' Health Study (NHS, période de suivi : 1980-2012) et de la Health Professionals Follow-up Study (HPFS, période de suivi : 1986-2012) a montré qu'une contribution supplémentaire de 10% des protéines animales à l'apport énergétique n'était pas associée à la mortalité toute cause mais était associée avec une mortalité plus élevée de 8% par maladies cardiovasculaires (Hazard Ratio (HR) : 1,08 [95%CI 1,01-1,16]) (Song et al., 2016). Une contribution supplémentaire de 3% des protéines végétales à l'apport énergétique était associée à une plus faible mortalité toute cause de 10% [95%CI 0,86-0,95] et une réduction de 12% [95%CI 0,80-0,97] du risque de mortalité par maladies cardiovasculaires. En séparant la population entre les individus ayant au moins un facteur de risque (tabac, surpoids/obésité, consommation d'alcool élevée ou faible activité physique) et ceux n'en ayant aucun, ces associations se retrouvaient uniquement chez les individus ayant au moins un facteur de risque. Ces individus se différenciaient des individus sans facteur de risque par leur consommation alimentaire : ils consommaient plus de viande rouge, charcuterie, œuf et moins de poulet, poisson, produits laitiers allégés, fibres, fruits, légumes et céréales complètes que les individus n'ayant aucun facteur de risque. Puis, en étudiant les associations sur toute la population entre les types de protéines animales et la mortalité, la consommation de protéines issues de viande transformée était la plus fortement associée à la mortalité toute cause et par maladies cardiovasculaires. Finalement, à partir d'un modèle multivariable, la substitution de 3% de l'apport énergétique de protéines animales par des protéines végétales était associé à une diminution de risque de mortalité toute cause (6 à 34%). Les réductions étaient les plus élevées pour la substitution de protéines de viande transformée (34% de réduction), d'œuf (19%) ou de viande rouge (12%) (Song et al., 2016).

Un des facteurs de risque de ces différentes maladies non-transmissibles est le surpoids (WHO, 2014). Il est ainsi intéressant d'étudier les relations entre la consommation de protéines et l'IMC ou la prise de poids. Dans une étude menée en Belgique (2004, n=3083) (Lin et al., 2011), il a été montré que les hommes consommant plus de protéines animales avaient un IMC plus élevé (β=0,013, *P*=0,001) ainsi qu'un tour de taille plus élevé (β=0,041, P=0,002). La consommation de protéines végétales était inversement associée à l'IMC (β=-0,036, *P*<0,001 pour les hommes ; β=-0,046, *P*=0,001 pour les femmes) et au tour de taille (β=-0,137, *P*<0,001 pour les hommes ; β=-0,096, *P*=0,024 pour les femmes). De même, à partir des données de l'étude EPIC de 5 pays européens (Danemark, Allemagne, Italie, Pays-Bas, Royaume-Uni, n=89 432), les associations entre la consommation de protéines et le changement de poids et de tour de taille ont été étudiées, avec un temps moyen de suivi de 6,5 années (Halkjær et al., 2011). Une consommation supplémentaire de 150 kcal de protéines totales par jour était associée à une prise de poids annuelle de 52,9g [95%CI 25,9-79,9]. La prise de poids était de 56,2g/an [95%CI 26,9-85,6] pour une consommation supplémentaire de 150kcal/j de protéines animales, et il n'y avait pas d'association avec la consommation de protéines végétales. L'association entre protéines animales et prise de poids était principalement attribuable à la consommation de protéines de viande rouge et transformée et de volaille, plutôt qu'à la consommation de protéines de poisson ou de produits laitiers. Aucune association n'a été trouvé avec l'augmentation du tour de taille (Halkjær et al., 2011).

Ces études montrent principalement un risque plus élevé de maladies non transmissibles avec la consommation de protéines animales mais d'autres études se sont spécifiquement intéressées aux associations entre consommation de légumineuses et santé. D'après la méta-analyse de Becerra-Tomás et al., la consommation de légumineuses serait associée à un moindre risque de 14% de maladies cardiovasculaire ([95%CI 0,80-0,94], d'après 4 études prospectives) et de 9% de maladies coronarienne ([95%CI 0,83-1,00], d'après 6 études prospectives) mais pas au risque d'AVC (accident vasculaire cérébral) ni au risque de diabète de type 2 (Becerra-Tomás et al., 2019). Dans une autre méta-analyse (Viguiliouk et al., 2019), la consommation de légumes secs, avec ou sans les autres légumineuses, était associée à un moindre risque de 8% de maladies cardiovasculaire ([95%CI 0,85-0,99], d'après 7 cohortes), de 10% de maladies coronariennes ([95%CI 0,83-0,99], d'après 10 cohortes), de 9% d'hypertension ([95%CI 0,86-0,97], d'après 7 cohortes) et de 13% d'obésité ([95%CI 0,81-0,97], d'après 1 cohorte), mais n'était pas associée à la mortalité cardiovasculaire et au risque d'infarctus du myocarde, d'AVC et de diabète de type 2. Le niveau de preuve des associations a été jugé faible à très faible, et lorsque la consommation de légumes secs sans les autres légumineuses, était étudiée, seul un moindre risque d'hypertension (RR : 0,92 [95%CI 0,87-0,98]) était associé à la consommation de légumes secs. Concernant le risque de diabète de type 2, une méta-analyse a montré à partir de 15 études de cohorte, qu'un moindre risque de diabète était associé à la consommation de tofu, de protéines de soja et d'isoflavones de soja, mais pas à la consommation totale de légumineuses ni à la consommation totale de soja, avec un niveau de preuve toutefois jugé limité (Tang et al., 2020). Une méta-analyses de 27 cohortes menées dans différentes régions du monde a montré une faible augmentation du risque de diabète par augmentation de 20g/j de légumineuses (Ratio de taux d'incidence de 1,02 [95%CI 1,01-1,04]) mais, au niveau régional, cette association se retrouvait uniquement en Europe (Ratio de taux d'incidence 1,05 [95%CI 1,01-1,1]) (Pearce et al., 2021). Dans ces deux méta-analyses, il a été observé une hétérogénéité importante des résultats entre les différentes études, qui peut s'expliquer par différentes méthodes de recueil des données alimentaires, d'analyses des données mais également par différents profils de consommation entre les pays, notamment différentes consommations des légumineuses (Pearce et al., 2021; Tang et al., 2020). Ainsi, d'après ces différentes études, il semblerait que la consommation de légumineuses soit principalement associée à un moindre risque de maladies cardiovasculaire mais les preuves restent limitées, et la diversité au sein des légumineuses rend les conclusions plus difficiles.

Ainsi, ces différentes études montrent que la consommation de protéines animales est associée à un risque plus élevé de maladies cardio-vasculaires, de diabète de type 2 et de mortalité, à l'inverse de la consommation de protéines végétales (Mariotti, 2019; Petersen et al., 2017). Cependant, ces associations varient en fonction du type de protéines animales, et il semblerait que seules les consommations de viande rouge et viande transformée soient associées à un risque accru de morbidité ou mortalité (Petersen et al., 2017). Cependant, bien que la plupart des études prennent en compte le mode de vie et d'autres éléments du régime alimentaire, il est difficile de juger si ces associations sont uniquement le fait de la consommation de viande ou d'un profil alimentaire et d'un mode de vie de moins bonne qualité chez les individus consommant de la viande (Petersen et al., 2017). Plusieurs études ont notamment relevé que les individus qui consommaient le plus de viande avaient plus tendance à être des hommes, à fumer et consommer de l'alcool régulièrement, à avoir un IMC plus élevé et à être moins physiquement actif que ceux en consommant moins (Tharrey et al., 2018; Zhong et al., 2020).

Afin d'évaluer spécifiquement les apports nutritionnels associés à la consommation de protéines, il est possible de modéliser des régimes où, à l'échelle d'un individu, les aliments sources de protéines animales sont substitués par des aliments sources de protéines végétales, sans modifier le reste de l'alimentation et en comparant la population d'étude avec elle-même (régime simulé vs observé). Une étude a simulé des substitutions de produits animaux par des produits végétaux dans l'étude NHANES 2007-2010 (n=17 387 adultes et enfants de plus de 2 ans) (Cifelli et al., 2016). Doubler la consommation des produits végétaux déjà consommés en réduisant par la même quantité la consommation de produits animaux permettrait de diminuer le pourcentage d'individus dont les apports sont inférieurs au BNM pour les vitamines C, E, B9, le magnésium et le fer. Mais cela augmenterait également le pourcentage d'individus dont les apports sont inférieurs au BNM pour les vitamines A, D, le calcium et les protéines. Ce scénario permettrait également d'augmenter les apports en fibres et de diminuer les apports en acides gras saturés et en sodium. En revanche, doubler la consommation des aliments protéiques végétaux (légumes secs, fruits à coque et graines, soja) déjà consommés a eu peu d'impact car ces aliments étaient initialement peu consommés. Vatanparast et al. ont également simulé des régimes où la consommation d'aliments protéiques végétaux (légumineuses, fruits à coque, graines) serait doublée et la consommation de viande rouge et viande transformée serait divisée par deux, à partir des données alimentaires d'une enquête représentative canadienne (Canadian Community Health Survey-Nutrition 2015, n=20 487) (Vatanparast et al., 2020). Par rapport aux régimes observés, les régimes simulés entraîneraient des apports plus faibles en protéines, cholestérol, zinc et vitamine B12 et des apports plus élevés en fibres, acides gras polyinsaturés, magnésium, vitamine B9, et n'auraient pas d'impact sur les autres nutriments. Ces substitutions amélioreraient la qualité de l'alimentation, évaluée par le score Nutrient Rich Food (NRF) (basé sur les apports en fibres, protéines, calcium, vitamine D, fer, magnésium, potassium, vitamine A, vitamine C, acides gras saturés, sucre et sodium) (Vatanparast et al., 2020).

De Gavelle et al. ont modélisé des changements de taille de portions d'aliments protéique dans le but d'améliorer la qualité de l'alimentation, par la mesure du PANDiet, dans l'échantillon INCA2 (2007-2007, n=1678) (de Gavelle et al., 2019). Dans un premier scénario, les changements se faisaient en conservant le même répertoire alimentaire des individus. Dans un second scénario, de nouveaux aliments pouvaient être introduits, si ces aliments étaient consommés par les individus d'un même profil de consommation protéique, précédemment identifié (de Gavelle et al., 2018). Dans le premier scénario, la contribution aux apports protéiques a augmenté principalement pour la volaille maigre, les pâtes, les légumineuses, le poisson gras et la viande maigre et a diminué pour la charcuterie, la viande grasse et les plats préparés. Dans le second scénario, la contribution aux apports protéiques a augmenté pour les légumineuses, les poissons gras, la volaille maigre, les pizzas et quiches, les yaourts et a diminué pour la charcuterie, les sandwichs et le fromage. L'augmentation du PANDiet était plus importante dans le second scénario, c'est-à-dire lorsque l'on autorisait l'introduction d'aliments qui ne faisait pas parti du répertoire de l'individu tel qu'il avait été relevé. Il y avait des différences en fonction des profils de consommation protéique, bien qu'il y ait des tendances communes. Par exemple, la contribution à l'apport protéique de la viande maigre augmentait seulement pour les « consommateurs de repas à emporter » et les « consommateurs de lait » et la contribution des légumineuses augmentait seulement pour les « consommateurs de volaille » et « consommateurs de poisson ». Ainsi, substituer des aliments protéiques par d'autres peut améliorer la qualité de l'alimentation si on réduit la

consommation d'aliments protéiques peu favorables à la santé en les remplaçant par des aliments de bonne qualité nutritionnelle.

Cependant, le régime alimentaire ne se compose pas uniquement d'aliments sources de protéiques, il est ainsi intéressant d'étudier les régimes alimentaires dans leur ensemble et évaluer les risques et bénéfices liés à une alimentation plus végétale.

2.2. Bénéfices et risques des régimes végétalisés

Dans cette partie, nous allons nous focaliser sur les associations chez les adultes entre l'adhésion à différents régimes végétalisés (avec ou sans exclusion de produits animaux) et différents évènements de santé, en comparaison à des régimes sans restriction, que nous qualifierons de non-végétariens.

Apports alimentaires et nutritionnels dans les régimes végétalisés

Les individus suivant un régime végétalisé (de semi-végétarien à végétalien) ont généralement une alimentation de meilleure qualité et plus proche des repères de consommations alimentaires que les individus non-végétariens (Parker & Vadiveloo, 2019). Ainsi, dans la cohorte UK BioBank (n=199 944), les consommations d'aliments riches en protéines (viande/poisson, produits laitiers, légumineuses/fruits à coque/substituts végétaux) ont été comparé en fonction de différents régimes alimentaires : non-végétarien consommateur régulier de viande rouge (> 3 fois/semaine), faible consommateur de viande rouge (≤3 fois/semaine), non consommateur de viande rouge (mais consommant de la volaille), pesco-végétarien, lacto-ovo-végétarien et végétalien (Kathryn Bradbury et al., 2017). Plus le régime était restrictif, plus les individus consommaient des légumineuses, fruits à coque, substituts végétaux de viande et de lait et moins les aliments riches en protéines contribuaient à l'apport énergétique total (25% de l'apport énergétique total chez les non-végétarien vs 15% chez les végétaliens). Les pesco-végétariens et lacto-ovo-végétariens consommaient en revanche plus de fromage que les non-végétariens. Il y avait aussi des différences au niveau des aliments non-protéiques et, en général, plus le régime était restrictif, plus les individus consommaient des fruits, légumes, céréales complètes, jus de fruits et moins de boissons sucrées et alcoolisées. Dans la cohorte NutriNet-Santé, les consommations de non-végétariens (n=90 664), lacto-ovo-végétariens (n=2370) et végétaliens (n=789) ont également été étudiées, et il a été montré que les lacto-ovo-végétariens et végétaliens consommaient plus de fruits, légumes, légumineuses, fruits à coque, céréales complètes, substituts végétaux et moins de boissons sucrées et alcoolisées que les non-végétariens (Allès et al., 2017). Dans la cohorte Adventist Health Study 2 (n=89 455), les personnes végétariennes consommaient également plus de fruits, légumes, céréales complètes, légumes secs, soja et produits à base de soja, fruits à coque et graines et moins de produits d'origine animale, de céréales raffinées, de boissons sucrées et alcoolisées et de produits sucrés ou salés comparé aux non-végétariens (Orlich et al., 2014). Ainsi, on peut voir que les régimes végétariens se distinguent quant à la consommations d'aliments protéiques (moins/pas de produits animaux et une consommation plus importante de légumineuses, fruits à coque et graines, céréales complètes) mais également sur la consommation d'autres groupes d'aliments avec une consommation qui semble plus proche des recommandations alimentaires (plus de fruits et légumes, moins de produits gras, sucrés ou salés et de boissons sucrées ou alcoolisées).

Ces différences de consommations alimentaires mènent à différents profils d'apports nutritionnels et les individus suivant des régimes semi-végétariens, lacto-ovo-végétariens ou végétaliens ont généralement des apports plus élevés en fibres, acides gras polyinsaturés, vitamines B9, C, E, fer et magnésium et moins d'apports en acides gras saturés et cholestérol par rapport aux non-végétariens, comme cela a été montré dans la cohorte EPIC-Oxford (n=30 251)(Sobiecki et al., 2016) et la cohorte NutriNet-Santé (n=93 823)(Allès et al., 2017). En revanche, ces individus ont également moins d'apports en protéines, vitamines A, D, certaines vitamines du groupe B (vitamine B12 notamment), calcium, zinc, sélénium et iode (Allès et al., 2017; Sobiecki et al., 2016). Steib et al. ont montré en Suède, à partir d'une enquête nationale (n=1760, 2010-2011) que les individus consommant le plus des légumineuses avaient des apports plus élevés en vitamines B1 et B9, fibres, fer, potassium et magnésium (**Figure 11**) (Steib et al., 2020). Ces différents profils alimentaires et nutritionnels pourraient ainsi à la fois présenter des bénéfices et des risques sur la santé des individus adoptant des régimes végétalisés. Notamment, ces différents profils de consommation pourraient mener à une exposition différente aux contaminants chimiques car les produits d'origine animale et végétale ne sont pas vecteurs des mêmes contaminants (Anses, 2011; Fleury et al., 2017) mais cet aspect ne sera pas approfondi par la suite.

	Non-consumers (n 987)	Quartiles of legume consumption (n 773)				*P value*	*P for trend*[a]
		Q1 (low)	Q2	Q3	Q4 (high)		
Total energy intake, kcal/day	1923 (556)	2057** (551)	1973 (536)	2042** (601)	2028* (551)	< 0.001	0.06
Fat, E%	33.9 (6.9)	34.5 (6.2)	33.5 (5.9)	34.4 (5.9)	33.6 (6.4)	0.78	0.50
Carbohydrate, E%	43.3 (7.8)	42.2 (7.3)	44.1 (6.8)	43.2 (7.1)	44.2 (7.1)	0.23	0.06
Dietary fiber, g/day	19.1 (5.3)	19.9 (6.2)	21.0*** (5.2)	22.2*** (6.1)	25.5*** (7.3)	< 0.001	< 0.001
Protein, E%	16.7 (3.4)	16.5 (3.4)	16.7 (2.9)	16.8 (3.1)	16.7 (3.3)	0.67	0.51
Alcohol, g/day	10.3 (13.2)	13.0* (14.2)	9.2 (11.9)	9.8 (12.9)	8.5** (13.2)	0.03	0.001
Total iron, mg/day	10.5 (2.9)	10.6 (2.6)	10.5 (2.4)	10.8 (2.3)	11.6*** (3.0)	< 0.001	< 0.001
Haem iron, mg/day	1.5 (1.5)	1.3 (1.0)	1.2 (0.9)	1.2*** (1.1)	1.1*** (1.4)	< 0.001	< 0.001
Iron from legumes, % of total iron intake	0	1.7*** (1.3)	4.1*** (2.5)	7.2*** (4.6)	13.3*** (7.5)	< 0.001	< 0.001
Folate, µg/day	254 (88)	250 (62)	273*** (97)	274*** (72)	313*** (118)	< 0.001	< 0.001
Potassium, g/day	3.1 (0.6)	3.1 (5.3)	3.2 (5.6)	3.3** (6.1)	3.3*** (6.4)	< 0.001	< 0.001
Magnesium, mg/day	328 (59.6)	338* (64)	344*** (62)	356*** (64)	382*** (94)	< 0.001	< 0.001
Thiamin, mg/day	1.3 (0.3)	1.2 (0.2)	1.3 (0.3)	1.3** (0.3)	1.3*** (0.3)	< 0.001	< 0.001
Zinc, mg/day	11.1 (2.2)	10.8 (2.1)	10.9 (2.0)	11.2 (2.0)	11.1 (2.3)	0.71	0.23
Calcium, mg/day	896.3 (247.6)	874.1 (238.9)	889.4 (245.4)	910.1 (232.4)	894.9 (283.4)	0.81	0.48
Selenium, µg/day	45.8 (16.3)	48.1 (16.4)	46.1 (14.8)	46.6 (14.9)	47.9 (18.2)	0.13	0.41
Vitamin B6, mg/day	2.1 (0.8)	2.1 (0.8)	2.1 (0.9)	2.1 (0.8)	2.1 (0.6)	0.26	0.22
Vitamin D, µg/day	6.8 (4.0)	8.0*** (4.4)	7.4 (4.3)	7.5* (4.4)	7.4 (5.8)	0.01	0.57

Consumers are presented in quartiles of energy-adjusted legume intake. Data expressed as means (SD) adjusted for total energy intake. E% = % of total energy intake
Mean value was significantly different from that of the non-consumer group: * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$ (generalized linear model). [a] Linear contrast post-estimation

Figure 11 : Apports nutritionnels par quartiles de consommation de légumineuses à partir des données de l'enquête Ricksmaten 2010-2011 (n=1760) en Suède (extrait de Steib et al., 2020)

Régimes végétalisés et santé à long-terme

Nous avons vu dans la première partie que les régimes végétalisés étaient plus durables et avaient un impact environnemental moins important que les régimes comprenant une consommation plus importante de produits animaux. Il est ainsi intéressant d'étudier si l'adoption de régimes alimentaires durables, en plus d'avoir un faible impact environnemental, serait favorable à la santé à long-terme.

Un indice de régime durable (Sustainable Diet Index, SDI) a été développé en se basant sur des critères nutritionnels, environnementaux, économiques et socioculturels (Seconda et al.,

2019). Un score plus élevé a été associé à une alimentation plus végétalisée comprenant plus de fruits, légumes et légumineuses et moins de produits animaux, de boissons alcoolisées et de produits sucrés (Seconda et al., 2019). Les associations entre ce score et le risque de maladies chroniques ont été étudiées dans l'étude NutriNet-Santé (n=25 589) (Seconda et al., 2020). Les individus ayant le score SDI le plus élevé (4ème quartile) avaient un risque de maladies chroniques (cancers et maladies cardiovasculaires) plus faible de 39% [95%CI 0,47-0,80] par rapport aux individus dans le 1er quartile. L'effet protecteur était observé plus spécifiquement sur le risque de cancers (HR : 0,56 [95%CI 0,41-0,77]) et de manière non significative sur les maladies cardio-vasculaires (HR : 0,74 [95%CI 0,44-1,25]) (Seconda et al., 2020).

Il est également possible d'évaluer les potentiels bénéfices de régimes alimentaires en utilisant des modèles de risque pour estimer la morbidité ou mortalité. Cobiac et Scarborough ont ainsi modélisé les potentiels bénéfices santé de régimes durables précédemment optimisés par Vieux et al (Vieux et al., 2018), en évaluant la mortalité, l'espérance de vie et les DALYs (Disability Adjusted Life Years, nombres d'années perdues en bonne santé) (Cobiac & Scarborough, 2019). Par rapport aux régimes observés au Royaume-Uni, France, Finlande, Italie et Suède, les régimes optimisés avec pour objectif de respecter les recommandations nutritionnelles permettraient d'éviter entre 0,19 [95%CI 0,18-0,21] (Italie) et 0,89 [95%CI 0,80-0,98] (Finlande) DALYs/personne. Les effets étaient encore plus importants lorsque les régimes étaient également optimisés pour réduire les émissions de GES. Si les régimes optimisés étaient suivis tout au long de la vie, cela pourrait entraîner un gain d'espérance de vie de 2,3 à 6,8 mois. Les plus grand bénéfices santé étaient observés pour les régimes réduisant le plus la consommation de viande rouge, charcuterie, sodium et lipides et augmentant la consommation de fibres. Les principales morts évitées étaient celles attribuables au cancer colorectal et au diabète de type 2 (Cobiac & Scarborough, 2019). De la même manière, Scarborough et al. ont modélisé les potentiels impacts sur la mortalité de trois scénarios de régimes alimentaires qui permettraient de réduire les émissions de GES au Royaume-Uni (Scarborough et al., 2012). Le scénario 1 représente une réduction de 50% de la consommation de viande et produits laitiers, remplacés par des fruits, légumes et céréales (-19% d'émissions de GES liées à l'agriculture) ; le scénario 2 représente une substitution de 75% des viandes de bœuf et mouton par des viandes de porc et volaille (-9% d'émissions de GES) ; le scénario 3 représente une réduction de 50% des viandes de porc et volaille, remplacés par des fruits, légumes et céréales (-3% d'émissions de GES). Comparé aux 226 743 décès au Royaume-Uni par maladie coronarienne, AVC ou cancers, le scénario 1 permettait d'éviter le plus de décès (36 910 décès évités [95%CI 30 192-43 592]), suivi par le scénario 3 avec 9297 décès évités [95%CI 7288-11 301] et le scénario 2 avec 1999 décès évités [95%CI 1739-2386] (**Figure 12**). Les principaux décès évités étaient liés aux maladies cardiovasculaires et, dans le scénario 1, la majorité des morts évitées était liée à une augmentation de la consommation de fruits et légumes (27 866 sur 36 910 morts évitées). Ainsi, des régimes alimentaires conçus pour réduire les émissions de GES, en réduisant notamment la consommation de produits animaux, permettraient de réduire le risque de certaines maladies et la mortalité liée à certaines maladies.

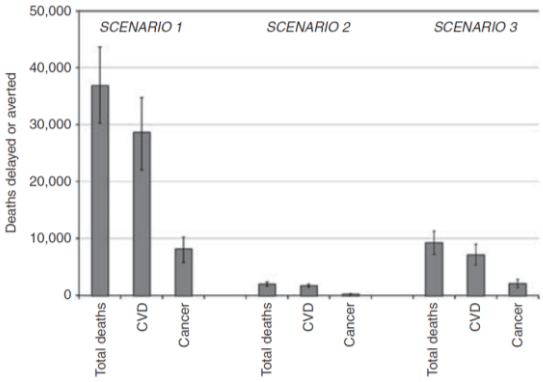


Figure 12: Estimation du nombre de morts évitées (totales, par maladies cardiovasculaires et par cancers) évitées ou ajoutées par scénarios de réduction des émissions de GES en comparaison au régime de référence (extrait de Scarborough et al., 2012)

Cependant, d'après un article de revue de 16 études, les associations entre émissions de GES des régimes, apports en nutriments et santé sont plutôt hétérogènes (Payne et al., 2016). Les régimes avec de faibles émissions en GES contiennent généralement moins de sel et d'acides gras saturés, mais sont également plus riches en sucres et apportent moins de certains micronutriments essentiels (calcium, zinc, vitamine B12, …). Concernant les effets sur la santé, les résultats divergent entre les 5 études incluses dans cette revue qui ont étudié cet aspect. Les études ayant considéré le niveau de consommation de viande et/ou produits laitiers montrent une association positive entre baisse des émissions de GES et réduction du risque de maladies non-transmissibles, alors que les autres études ne montrent pas d'association ou un risque plus élevé pour les régimes avec de faibles émissions de GES (Payne et al., 2016). Par exemple, dans la cohorte EPIC-NL (n=35 057), les émissions de GES et l'utilisation des sols liées au régime alimentaire n'étaient pas associées à la mortalité (respectivement HR : 1,00 [95%CI 0,86-1,17] et HR : 1,05 [95%CI 0,89-1,23] pour le 4ème vs 1er quartile d'émissions de GES et d'utilisation des sols) (Biesbroek et al., 2014). En revanche, l'impact potentiel sur la mortalité de la substitution de 35 g/jour de viande par la même quantité d'aliments de substitution a été étudiée selon un modèle multivariable et cette substitution était associée à une réduction de la mortalité de 19% [95%CI 3-33%] avec le poisson comme aliment de substitution, 11% [95%CI 4-16%] avec les pâtes/riz/couscous, 9% [95%CI 3-15%] avec les légumes, 6% [95%CI 1-10%] avec les fruits/graines/fruits à coque, mas il n'y avait pas d'association pour la substitution avec des desserts lactés, du fromage ou des pommes de terre. La réduction de 35 g/jour de viande sans substitution était également associée à un moindre risque de mortalité de 4% [95%CI 2-7%] (Biesbroek et al., 2014). Ainsi, ces résultats rejoignent en partie ce que nous avons vu en première partie : les régimes avec un moindre impact environnemental ne sont pas nécessairement les régimes avec le meilleur profil nutritionnel. Finalement, la réduction de la consommation de produits animaux semble plus déterminante pour prédire des bénéfices santé à long-terme plutôt que la seule réduction des émissions de GES. Ainsi, nous allons nous focaliser par la suite sur les régimes végétalisés.

Martínez-González et al. ont développé un indice pro-végétarien basé sur la consommation d'aliments d'origine végétale (fruits, légumes, fruits à coque, céréales, légumineuses, huile d'olive, pomme de terre) et d'aliments d'origine animale (matières grasses animales, œufs, poisson, produits laitiers, viande) (Martínez-González et al., 2014). Pour chaque groupe d'aliments, les individus étaient séparés en quintiles de consommation et recevaient des points en fonction du quintile où ils se trouvaient. Pour les aliments d'origine végétale, les individus

dans le 1er quintile recevaient 1 point et ceux dans le 5ème quintile recevaient 5 points, et l'inverse était effectué pour les aliments d'origine animale (1er quintile = 5 points, 5ème quintile = 1 point). Le score pro-végétarien est la somme des points de chaque groupe d'aliments et varie de 12 (faible adhésion à un régime pro-végétarien) à 60 (forte adhésion). Un score plus élevé était associée à une moindre mortalité toutes causes dans la cohorte PREDIMED en Espagne (n=7216 participants de plus de 55 ans, sans antécédent de maladie cardiovasculaire mais ayant du diabète de type 2 ou cumulant plus de 3 facteurs de risque cardiovasculaire) (Martínez-González et al., 2014). Ce score a également été mis en place dans la cohorte NutriNet-Santé (n=42 544 participants de plus de 45 ans) et un score plus élevé était associé à un moindre risque de cancers tout type, de cancer digestif et de cancer du poumon, mais il n'y avait pas d'association avec les cancers du sein et de la prostate (Kane-Diallo et al., 2018).

Parmi les différents régimes végétalisés et pauvre en viande, le régime méditerranéen est souvent montré en exemple. Il est défini comme un régime consistant en une consommation importante de légumes, fruits, céréales complète, pomme de terre, légumineuses, fruits à coque et graines et d'huile d'olive et une consommation faible ou modérée de produits animaux et de vin (Salas-Salvadó et al., 2018). Plusieurs études ont montré que l'adhésion à un régime méditerranéen était associée à un moindre risque de maladies cardio-vasculaires et de mortalité par maladies cardio-vasculaires, mais serait également inversement associé à différents facteurs de risque cardiovasculaires (pression artérielle, triglycérides, HDL, …) (Salas-Salvadó et al., 2018). Ces associations pourraient notamment s'expliquer par le fait que ce régime est généralement riche en fibres, acides gras mono et polyinsaturés, mais aussi en polyphénols, vitamines et minéraux, et contient de faibles apports en acides gras saturés (Salas-Salvadó et al., 2018).

Finalement, de nombreuses études se sont concentrés sur les régimes végétariens et ont montré que l'adhésion à ces régimes seraient associée à un moindre risque de maladies non-transmissibles, telles que les maladies cardiovasculaires ou le diabète de type 2 (McEvoy et al., 2012). Les cohortes EPIC-Oxford (et précédemment Oxford Vegetarian Study) et AHS-2 permettent d'étudier les conséquences sur la santé des régimes végétariens, du fait d'une large proportion de personnes végétariennes (Segovia-Siapco & Sabaté, 2019). D'après les différents résultats obtenus des cohortes Oxford Vegetarian Study et EPIC-Oxford, les pesco-végétariens, lacto-ovo-végétariens et végétaliens auraient un risque réduit de cancer toute cause de respectivement 11%, 11% et 19% par rapport aux non-végétariens. Plus spécifiquement, les pesco-végétariens auraient un risque réduit de 23% de cancer colorectal et les pesco-végétariens et lacto-ovo-végétariens un risque réduit de cancer de la prostate de respectivement 11% et 10%. D'après les études menées dans la cohorte AHS-2, les végétaliens auraient un risque réduit de 16% de cancer toute cause et les lacto-ovo-végétariens un risque réduit de 42% de cancer colorectal. Les lacto-ovo-végétariens et végétaliens auraient également un moindre risque d'hypertension (respectivement 43% et 63%) et de diabète (respectivement 38 et 62%). A part un risque réduit de diabète de 51% dans la cohorte AHS-2, il y a peu de différences significatives entre les semi-végétariens, ou faible consommateur de viande, et les non-végétariens concernant la morbidité ou mortalité. Concernant les maladies cardiovasculaires, il a été montré dans la cohorte EPIC-Oxford (n=48 188) après un suivi moyen de 18,1 ans, que, par rapport aux non-végétariens, les végétariens (végétaliens inclus) avaient un risque réduit de 22% [95%CI 0,70-0,87] de maladie coronarienne mais un risque plus élevé de 20% [95%CI 1,02-1,40] d'AVC (Tong et al., 2019). Plus particulièrement, le risque était plus élevé uniquement pour les AVC hémorragiques (c-à-d. par rupture d'un vaisseau sanguin intracérébral) (HR : 1,43 [95%CI 1,08-1,90]) mais non

significatif pour les AVC ischémiques (obstruction d'une artère cérébrale) (HR : 1,12 [95%CI 0,90-1,41]). Les pesco-végétariens avaient, par rapport aux non-végétariens, un risque plus faible de 13% [95%CI 0,77-0,99] de maladie coronarienne mais pas d'effet significatif sur le risque d'AVC (HR : 1,14 [95%CI 0,94-1,38]).

En conclusion, nous avons vu que dans l'ensemble, les régimes végétalisés étaient associés à un moindre risque de maladies non-transmissibles. Cela pourrait être lié soit à la réduction de la consommation de produit animaux ou à une consommation plus importante de produits végétaux. Cependant, il faut également noter que les personnes végétariennes se différencient également des personnes non-végétariennes au niveau des caractéristiques sociodémographiques et du mode de vie. Les individus qui ne consomment pas de viande ont tendance à être plus jeune avec une activité physique plus importante que les consommateurs de viande (Kathryn Bradbury et al., 2017). Dans l'étude NutriNet-Santé, les végétariens avaient plus tendance à être des femmes, jeunes, célibataires avec un faible revenu et les végétaliens avaient plus tendance à être des hommes (Allès et al., 2017). Dans l'étude EPIC-Oxford, les pesco-végétariens et végétariens sont plus jeunes et diplômés, font plus d'activité physique et ont moins tendance à fumer et à boire de l'alcool régulièrement que les non-végétariens (Tong et al., 2019). Bien que ces facteurs soient généralement pris en compte dans les modèles d'analyses, il peut rester des facteurs de confusion qui peuvent biaiser les associations observées. Nous allons ensuite étudier si l'adoption de régimes végétalisés peut entraîner un risque de carence plus élevé pour certains nutriments, puisque les apports nutritionnels diffèrent en fonction des aliments consommés et des régimes suivis.

Régimes végétalisés et risque de carence

L'Académie de nutrition et de diététique aux Etats-Unis a statué qu'un régime végétarien, y compris végétalien, bien planifié pouvait être nutritionnellement adéquat et adapté à tous les stades de la vie (Melina et al., 2016). Cependant, dans certaines situations, la complémentation en certains micronutriments est recommandée (comme dans le cas d'une grossesse, ou pour les végétaliens concernant la supplémentation en vitamine B12) (Melina et al., 2016). Ainsi, il est intéressant d'étudier si les personnes suivant des régimes plus ou moins exclusifs en produits animaux sont plus à risque d'inadéquation d'apports ou de carences. Les risques de carences ont principalement été étudiés chez les lacto-ovo-végétariens et végétaliens que chez les individus consommant peu de viande. Ainsi, cette partie se focalisera essentiellement sur la comparaison entre végétariens/végétaliens et non-végétariens dans des populations adultes mais on peut aisément supposer que les individus adoptant des régimes pauvres en viande se situent entre ces deux groupes.

Dans la cohorte NutriNet-Santé, il a été montré que les lacto-ovo-végétariens et végétaliens avaient des prévalences d'inadéquation plus élevées pour certaines vitamines du groupe B et le zinc par rapport aux non-végétariens, mais avaient des prévalences d'inadéquation plus faibles pour les vitamines B9, C, E et le magnésium (Allès et al., 2017). Par exemple, pour la vitamine B12, en fonction du sexe et de l'âge, la prévalence d'inadéquation variait de 0,6-3,7% chez les non-végétariens, à 16,8-45,3% chez les lacto-ovo-végétariens et 49,8-83,4% chez les végétaliens (Allès et al., 2017). Une étude menée dans la cohorte EPIC-Oxford (n=30 251) a également estimé les prévalences d'inadéquation pour plusieurs nutriments chez des individus ayant des régimes végétaliens, lacto-ovo-végétariens, pesco-végétariens et non-végétariens (**Figure 13**) (Sobiecki et al., 2016). Pour certains nutriments (vitamines B1, B3, B6, C) les prévalences d'inadéquation sont faibles quel que soit le régime considéré, mais d'autres nutriments sont plus problématiques. Ainsi, pour la vitamine B12, la prévalence

d'inadéquation est quasiment nulle chez les non-végétariens et pesco-végétariens (0,1-1,2 %) mais plus élevée chez les lacto-ovo-végétariens (17%) et chez les végétaliens (85-89%). Une évolution similaire est observée pour l'iode : environ 4% de prévalence d'inadéquation chez les non-végétariens, 9% chez les pesco-végétariens, 29-33% chez les lacto-ovo-végétariens et 93-94% pour les végétaliens. On observe également une augmentation de la prévalence d'inadéquation pour les lacto-ovo-végétariens et végétaliens pour le fer (11-20% vs. 0-1% pour les non-végétariens et pesco-végétariens) et le zinc (30-74% vs. 2-9% pour les non-végétariens et pesco-végétariens), en effectuant une correction pour prendre en compte une biodisponibilité plus faible dans ces régimes. Pour le calcium, on observe une prévalence d'inadéquation plus élevée chez les végétaliens (14-17%) que pour les autres régimes alimentaires (moins de 3%). On observe également des prévalences d'inadéquation plus faibles pour les vitamines E et B9, magnésium chez les pesco-végétarien, lacto-ovo-végétarien et végétaliens comparés aux non-végétariens (Sobiecki et al., 2016). Cependant, ces évaluations ne prennent pas en compte la consommation de compléments alimentaires ce qui pourrait surestimer la prévalence d'inadéquation, notamment pour les végétaliens et lacto-ovo-végétariens qui ont tendance à consommer plus de compléments alimentaires que les non-végétariens, notamment ceux contenant de la vitamine B12 (Sobiecki et al., 2016).

Nutrient	EAR value [a]	Meat eaters		Fish eaters		Vegetarians		Vegans	
		M	W	M	W	M	W	M	W
Protein	M, W: 0.6 g/kg of body weight	2.5%	1.2%	4.5%	1.8%	9.8%	6.0%	16.5%	8.1%
Vitamin A (RE)	M: 500 µg RE, W: 400 µg RE	3.1%	1.0%	4.5%	1.0%	4.2%	1.3%	7.8%	3.2%
As RAE	M: 500 µg RAE, W: 400 µg RAE	11.7%	5.4%	19.7%	8.3%	22.4%	9.3%	37.2%	19.9%
Vitamin E [b]	12 mg	52.8%	56.1%	39.1%	46.4%	39.1%	47.1%	23.8%	26.8%
Vitamin B_1	0.072 mg/1000 kJ (0.3 mg/1000 kcal)	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Vitamin B_2	M: 1.0, F: 0.9 mg	1.3%	1.2%	1.7%	2.0%	2.8%	2.5%	11.5%	11.4%
Niacin	1.31 mg/1000 kJ (5.5 mg/1000 kcal)	0.1%	0.1%	0.0%	0.3%	1.1%	2.1%	0.0%	0.7%
Vitamin B_6	13 µg/1 g of dietary protein	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Vitamin B_{12}	1.25 µg	0.1%	0.1%	1.2%	0.5%	17.0%	17.2%	84.8%	89.0%
Folate	150 µg	0.2%	0.4%	0.3%	0.3%	0.2%	0.3%	0.4%	0.4%
IOM EAR [c]	320 µg	21.9%	24.6%	15.9%	18.9%	14.1%	20.1%	13.8%	14.6%
Vitamin C	25 mg	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.2%
Calcium	525 mg	2.5%	2.6%	1.8%	2.2%	3.0%	2.7%	17.1%	13.5%
IOM EAR [d]	M <71 y, W <51 y: 800 mg; M ≥71 y, W ≥51 y: 1000 mg	26.3%	39.4%	18.0%	33.4%	20.6%	33.4%	52.0%	64.2%
Magnesium	M: 250 mg, F: 200 mg	6.4%	1.8%	2.7%	1.0%	3.2%	1.4%	3.3%	1.1%
Iron [e]	M, W ≥51 y: 6.7 mg	0.4%	0.8%	0.5%	0.8%	0.3%	0.7%	0.7%	0.8%
Bioavailability adjusted [f]	Values multiplied by 1.8 for vegetarians and vegans	0.4%	0.8%	0.5%	0.8%	11.3%	19.2%	11.5%	12.9%
Zinc	M: 7.3 mg, W: 5.5 mg	8.3%	1.6%	9.3%	2.9%	12.3%	3.6%	26.8%	9.9%
Bioavailability adjusted [f]	Values multiplied by 1.5 for vegetarians and vegans	8.3%	1.6%	9.3%	2.9%	55.3%	29.5%	73.6%	55.8%
Selenium [b]	45 µg	12.3%	14.4%	11.9%	19.5%	43.1%	60.4%	32.7%	48.9%
Iodine [f]	95 µg	4.1%	4.0%	8.8%	8.9%	33.4%	28.7%	93.7%	92.5%

Abbreviations: EAR, Estimated Average Requirement; M, men; W, women; RE, retinol equivalents; RAE, retinol activity equivalents; IOM, Institute of Medicine.
Prevalence of inadequate intakes was estimated using the EAR cut-point method.
[a] Source: unless specified otherwise, Department of Health, 1991. Dietary reference values for food, energy and nutrients in the United Kingdom.
[b] Source: IOM, 2000. Dietary reference intakes for vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids.
[c] Source: IOM, 1998. Dietary reference intakes for thiamin, riboflavin, niacin, Vitamin B_6, folate, vitamin B_{12}, pantothenic acid, biotin, and choline.
[d] Source: IOM, 1998. Dietary reference intakes for calcium and vitamin D.
[e] Prevalence calculated in women for the ≥51-year age group only (see Section 2.3).
[f] Source: IOM, 2001. Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc.

Figure 13 : Prévalence d'inadéquation d'apports en nutriments calculés à partir des seules consommations alimentaires, par sexe et régime alimentaire (extrait de Sobiecki et al., 2016)

Cependant, des apports inférieurs aux besoins ne mènent pas systématiquement à des carences car l'établissement de certains besoins prend en compte d'autres critères que la prévention des carences, comme la constitution de réserves suffisantes ou la maximisation de certains marqueurs biologiques (National Research Council, 1986; Otten et al., 2006). De plus, pour certains nutriments, le besoin ne peut pas être déterminé et des apports satisfaisants sont définis à la place (EFSA, 2017; Otten et al., 2006). Ainsi, en plus d'évaluer les prévalences d'inadéquation, il est également intéressant de regarder les statuts en micronutriments en fonction des régimes alimentaires.

Schüpbach et al. ont ainsi comparé les statuts en micronutriment d'adultes suisses ayant des régimes omnivores (n=100), lacto-ovo-végétarien (n=53) et végétalien (n=53) (Schüpbach et al., 2015). Les végétaliens avaient les concentrations plasmatiques les plus élevées pour le magnésium, les vitamines C, B1, B6, B9 et les omnivores avaient les concentrations plasmatiques les plus élevées en zinc, vitamines A, B3 et E et la concentration urinaire en iode la plus élevée. Cependant, 65% des omnivores avaient des concentrations en iode inférieures aux normales, de même que 66% de lacto-ovo-végétarien et 79% de végétaliens. 47% des végétaliens avaient des concentrations plasmatiques en zinc inférieures aux normales, contre 19% des lacto-ovo-végétariens et 11% des omnivores. A l'inverse, 58% des omnivores avaient des concentrations en acide folique inférieures aux normales contre 30% des lacto-ovo-végétariens et 13% des végétaliens (Schüpbach et al., 2015). Elorinne et al. ont également montré à partir des analyses biologiques de 22 végétaliens et 19 non-végétariens finlandais, que les végétaliens avaient un moins bon statut biologique en vitamine D, β-carotène, sélénium et iode que les non-végétariens (Elorinne et al., 2016). Notamment, tous les végétaliens mais également 91% des non-végétariens avaient des concentrations urinaires en iode inférieure à 100 µg/L. En effet, les végétaliens auraient plus de risque d'avoir des apports insuffisants en iode, mais il s'avère que le statut en iode est déjà sous-optimal dans plusieurs pays (Benoist et al., 2004). Selon une revue de la littérature regroupant 15 articles évaluant les apports et le statut en iode en fonction des régimes alimentaires, les végétaliens ont tendance à avoir les plus faibles apports en iode, comparé aux lacto-ovo-végétariens et non-végétariens (Eveleigh et al., 2020). Dans plusieurs des études incluses dans cette revue, les médianes des concentrations urinaires en iode étaient inférieures aux normes pour les végétaliens, mais également dans certains cas pour les lacto-ovo-végétariens et les non-végétariens (**Figure 14**) (Eveleigh et al., 2020).

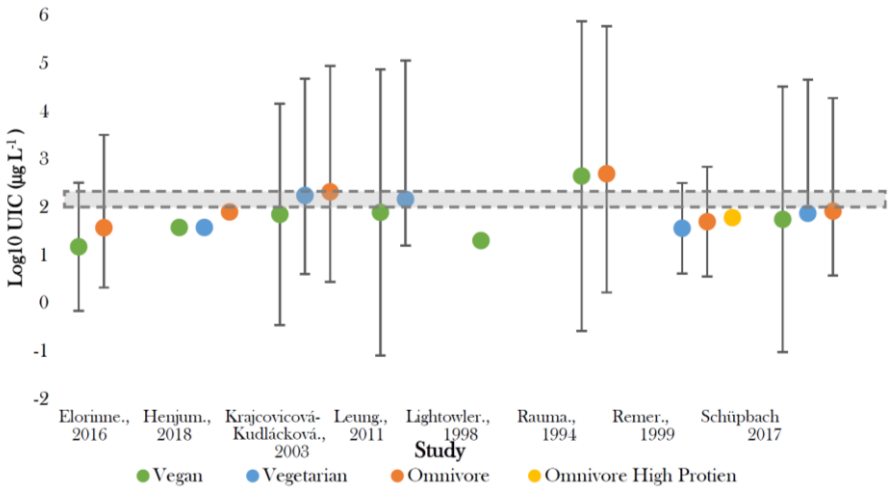


Figure 14: Représentation du statut en iode évalué par la concentration médiane urinaire d'iode (UIC) pour les études incluses dans la revue de Eveleigh et al. La barre grise représente la fourchette optimale du statut en iode (100-299 µg/L) (extrait de Eveleigh et al., 2020)

Plusieurs études ont constaté des apports en fer plus élevés pour les végétariens par rapport aux non-végétariens (Allès et al., 2017; Schüpbach et al., 2015; Sobiecki et al., 2016). Cependant, l'apport total en fer n'est pas suffisant pour évaluer l'adéquation des apports car l'absorption du fer dépend de plusieurs paramètres (Armah et al., 2013; Hunt, 2003). Le fer existe sous deux formes : le fer héminique (qui constitue une partie du fer de la viande et du poisson) et le fer non-héminique, qui est moins bien absorbé que le fer héminique (Hunt, 2003). L'absorption du fer non-héminique est favorisée par la consommation de vitamine C, de viande, volaille et poisson mais est diminuée par la consommation de thé, de phytates et de calcium (Armah et al., 2013; Hunt, 2003). La biodisponibilité du fer non-héminique peut être prise en compte au moyen d'équations prédictives (Armah et al., 2013). Dans l'étude de Schüpbach et al., les lacto-ovo-végétariens et végétaliens avaient les apports en fer les plus élevés (respectivement 14,7 et 22,9 mg/j contre 11,8 mg/j pour les non-végétariens) mais la ferritine avait tendance à être plus basse (respectivement 32 et 40 ng/mL contre 58 ng/mL pour les non-végétariens), avec un pourcentage d'individu ayant une ferritine inférieure à la normale similaire entre les différents régimes (11-14%) (Schüpbach et al., 2015). Ainsi, en plus de regarder les apports en fer, il est important d'étudier la concentration en ferritine, qui est un marqueur des réserves en fer de l'organisme, en fonction des régimes alimentaire.

Haider et al. ont mené une méta-analyse sur 24 études transversales sur les régimes végétariens et le statut en fer (Haider et al., 2018). Comparé aux non-végétariens, des valeurs de ferritine plus basses étaient observées pour les végétariens (ovo-lacto-végétariens et végétaliens) (-29,71 µg/L [95%CI -39,69, -19,73]), avec des différences plus marquées pour les hommes (-61,88 µg/L [95%CI -85,59, -38,17]) que pour les femmes (-13,50 [95%CI -22,96, -4,04]). Les études ayant évalué la ferritine chez les semi-végétariens montrent également une ferritine plus faible par rapport aux non-végétariens (-31,99 µg/L [95%CI -47,03, -16,96]). Il a également été montré que les végétariens avaient un plus grand pourcentage d'individus ayant une valeur de ferritine sous les valeurs seuils (**Figure 15**). Par exemple, en considérant les études ayant utilisé un seuil à 12 µg/L (seuil utilisé par le plus d'études), 28,8% des femmes et 5,8% des hommes végétariens avaient une ferritine inférieure à ce seuil, contre 17,6% des femmes et 2,0% des hommes non-végétariens (Haider et al., 2018). Ainsi, les réserves en fer semblent plus faibles chez les personnes végétariennes mais étant donné que l'absorption du

fer est augmentée lorsque la ferritine est basse (Armah et al., 2013), cela n'entraîne pas nécessairement d'anémie ferriprive et les populations végétariennes ne semblent pas avoir des prévalences plus élevées d'anémie ferriprive que les populations non-végétariennes (Moretti, 2017).

	Premenopausal women					All women					Men				
		VEG		NV			VEG		NV			VEG		NV	
Cut-off [μg/L]	Studies	n	%	N	%	Studies	n	%	n	%	Studies	n	%	n	%
<25	2	29	55.2	35	48.6	4	52	42.3	48	50.0	4	67	19.4	41	7.3
<20	3	49	57.1	54	33.3	6	108	58.3	103	41.7	5	47	21.3	43	7.0
<15	2	21	52.4	29	17.2	5	102	15.7	92	10.9	4	218	1.4	116	0.9
<12	4	129	38.8	100	20.0	9	306	28.8	244	17.6	9	414	5.8	294	2.0
<10	4	79	26.6	114	25.4	7	109	22.9	141	22.7	4	33	2.0	29	0.0

n: total number of participants; %: percentage of *n* below cut-off.

Figure 15: Pourcentage de végétariens (VEG) et non-végétariens (NV) sous les valeurs seuils de ferritine selon le sexe (extrait de Haider et al., 2018)

Comme pour le fer, l'absorption du zinc dépend de plusieurs facteurs alimentaires et notamment de la consommation de phytates, qui sont les principaux inhibiteurs de l'absorption du zinc (Foster & Samman, 2015; Hunt, 2003). Cependant, les phytates se retrouvent dans de nombreux produits d'origine végétale et il est ainsi estimé que les individus ayant une alimentation riche en végétaux ont une moins bonne absorption du zinc et par conséquent, des besoins en zinc plus élevé (WHO & FAO, 2004). Comme pour le fer non-héminique, il est possible d'estimer la biodisponibilité du zinc en fonction des apports en phytates à partir d'une équation prédictive (EFSA NDA Panel, 2014). Foster et al. ont mené une méta-analyses sur les régimes végétariens et les apports et statuts en zinc (Foster et al., 2013). Les végétariens (de semi-végétariens à végétaliens) auraient des apports plus faible en zinc comparé aux non-végétariens, d'après les résultats de 18 études (- 0,88 ± 0,15 mg/j, *P*<0,001) et également une concentration plus basse en zinc plasmatique (-0,93 ± 0,27 µmol/L, *P*=0,001) d'après les résultats de 13 études (Foster et al., 2013). Cependant, chez les adultes en bonne santé, un statut plus faible en zinc ne semble pas associé à des effets délétères sur la santé (Foster & Samman, 2015).

Concernant le calcium, il est difficile d'estimer le risque de carence à partir d'analyses biologiques puisqu'il y a une homéostasie calcique, c'est-à-dire une régulation permettant de maintenir une quantité suffisante de calcium circulant (Anses, 2021; Otten et al., 2006). Ainsi, si les apports en calcium sont insuffisants, le calcium va être puisé dans le squelette, qui contient 99% du calcium présent dans l'organisme, et une insuffisance d'apport sur le long terme va entraîner une réduction de la masse osseuse qui peut entraîner de l'ostéoporose ou de l'ostéomalacie et augmenter le risque de fractures (Anses, 2021; Otten et al., 2006). Bien que l'on trouve également du calcium dans les produits végétaux, celui-ci serait moins bien absorbé que le calcium issu des produits laitiers (Otten et al., 2006). Les laco-ovo-végétariens et végétaliens auraient notamment une densité minérale osseuse plus faible mais seuls les végétaliens auraient un risque plus élevé de fracture (Iguacel et al., 2019). Dans l'étude EPIC-Oxford (n=34 696), après une période de suivi de 5,2 ans, il a été montré que les végétaliens avaient une incidence plus élevée de fracture par rapport aux non-végétariens (1,30 [95%CI 1,02-1,66]) (Appleby et al., 2007). Dans cette étude, les apports en calcium étaient similaires entre les non-végétariens, les pesco-végétariens et les lacto-ovo-végétariens (environ 100-1100 mg/j) et inférieures pour les végétaliens (≈600 mg/j). Notamment, 45% des végétaliens avaient des apports en calcium inférieurs à 525 mg/j contre seulement 5-6% des lacto-ovo-

végétariens, pesco-végétariens et non-végétariens. L'association entre régime végétalien et incidence de fracture n'était plus observée lorsque le modèle était ajusté sur les apports en calcium (1,15 [95%CI 0,89-1,49]) ou en considérant seulement les individus dont les apports sont supérieurs à 525 mg/jour (1,00 [95%CI 0,69-1,44]). On pourrait ainsi supposer que le risque de fracture plus élevé pour les végétaliens serait causé par des apports très faibles. En revanche, les pesco-végétariens et les lacto-ovo-végétariens n'ont pas plus de risque de fracture et ont des apports similaires en calcium que les non-végétariens, ce qui est assez cohérent puisque ces individus n'excluent pas les produits laitiers de leur alimentation.

Finalement, le cas de la vitamine B12 est un peu particulier car, contrairement aux autres nutriments qui se trouvent à la fois dans les aliments d'origine animale et végétale, la vitamine B12 ne se trouve pas dans les aliments d'origine végétale, ou dans des formes qui seraient peu assimilables par l'organisme (Rizzo et al., 2016). Les végétaliens, mais également les lacto-ovo-végétariens, auraient ainsi un risque de carence plus élevé que les non-végétariens et la supplémentation s'avère généralement nécessaire. Cependant, les symptômes de carence peuvent prendre plusieurs années à se manifester, le temps que le corps épuise ses réserves, et il n'y a pas de consensus concernant l'établissement de la carence en vitamine B12 par l'intermédiaire des mesures biologiques (Rizzo et al., 2016). En effet, le dosage plasmatique de la vitamine B12 peut être réalisé mais le seuil associé à une carence varie entre les pays entre 110 pmol/L (Autriche) et 250 pmol/L (Allemagne). De plus, ce dosage ne serait pas suffisant pour poser le diagnostic de carence et le dosage de l'homocystéine ou l'acide méthylmalonique peut également être réalisé (Rizzo et al., 2016). Mais bien que les végétaliens soient plus à risque de carences en vitamine B12, Elorinne et al. ont montré que seulement 5% des végétaliens de leur étude avaient des concentrations plasmatiques en vitamine B12 inférieures à la normale (ici 140 pmol/L). Les autres participants avaient des valeurs normales ce qui pourrait notamment s'expliquer par le fait que 91% des végétaliens de l'échantillon consommaient des compléments de vitamine B12 (Elorinne et al., 2016).

Ainsi, les risques plus élevés de prévalence d'inadéquation ou de carence semblent principalement associés à un régime végétalien et non un régime lacto-ovo-végétarien ou pesco-végétarien. Mais il est également intéressant de noter que l'adoption d'un régime végétalisé pourrait également améliorer le statut en certains nutriments insuffisamment consommés. Ainsi, on peut supposer qu'un régime végétalisé, principalement basé sur des produits végétaux tout en contenant une consommation modérée de produits animaux permettrait à la fois des meilleurs apports en nutriments insuffisamment consommés tout en maintenant des apports adéquats en certains nutriments essentiellement apportés par les produits animaux.

Dans cette partie, nous avons étudié les régimes végétalisés par rapport à leur niveau de réduction ou d'exclusion de produits animaux. Cependant, nous avons peu abordé la nature des aliments végétaux consommés par les individus, alors qu'il existe une grande diversité de produits végétaux qui n'ont pas tous la même valeur nutritionnelle. Ainsi, dans la prochaine partie, nous allons étudier les régimes végétalisés, non pas en fonction de l'éviction des produits animaux, mais en fonction de la nature des produis végétaux consommés.

2.3. Impacts sur la santé en fonction des profils d'aliments végétaux consommés

A partir d'un sondage en ligne mené sur un panel international (n=246), les choix alimentaires et le mode de vie d'individus suivant un régime végétalien pour des raisons de santé ou pour des raisons éthiques ont été comparés (Radnitz et al., 2015). Les individus suivant ce régime pour des raisons éthiques ont déclaré consommer plus de produits à base de soja et de produits sucrés et moins de fruits et jus de fruits que ceux suivant le régime pour des raisons de santé. Ils avaient également tendance à consommer plus de compléments alimentaires. Il semblerait alors que les motivations à changer de régime alimentaire pourrait influencer les choix alimentaires, et par conséquent la qualité du régime suivi. Cependant, cette étude a été menée sur un nombre limité d'aliments et il serait intéressant d'étudier plus en détail les différences de qualité des régimes en fonction des motivations à suivre des régimes végétalisés de manière plus générale.

Le principal outil qui a été utilisé pour évaluer la qualité des régimes végétalisés et leurs impacts sur la santé est le plant-based diet index (PDI) et ses déclinaisons, le healthy PDI (hPDI) et le unhealthy PDI (uPDI), développés par Satija et al. (Satija et al., 2016). Ces indices sont basés sur le même principe que le score pro-végétarien développé par Martínez-González et al. (Martínez-González et al., 2014), mais prennent en compte si les aliments végétaux sont considérés sains ou non, à partir des connaissances sur les liens entre consommation de groupes d'aliments et santé. Comme pour le score pro-végétarien, pour les 18 groupes d'aliments inclus dans ces scores, les individus sont catégorisés en quintile en fonction de leur niveau de consommation et reçoivent 1 à 5 points en fonction du quintile où ils se situent. Pour les groupes comptés positivement, les individus dans le 1er quintile reçoivent 1 point et ceux dans le 5ème quintile reçoivent 5 points. Pour les groupes comptés négativement, c'est l'inverse (1er quintile=5 points jusqu'au 5ème quintile=1 points). Le PDI compte positivement les groupes d'aliments végétaux et négativement les groupes animaux ; le hPDI compte positivement les groupes d'aliments végétaux considérés comme sains (céréales complètes, fruits, légumes, fruits à coque, légumineuses, huiles végétales, thé/café) et négativement les autres groupes ; le uPDI compte positivement les groupes d'aliments végétaux qui ne sont pas considérés sains (jus de fruits, céréales raffinées, pomme de terre, boissons sucrées, produits sucrés) et négativement les autres groupes (**Tableau 2**)(Satija et al., 2016). Ainsi, le PDI mesure l'adhésion à un régime végétalisé dans son ensemble, le hPDI à un régime végétalisé principalement basé sur des aliments végétaux sains et le uPDI à un régime végétalisé principalement basé sur des aliments végétaux considérés comme peu sains. Chaque score peut varier de 18 (faible adhésion) à 90 (forte adhésion).

Tableau 2 : Système de notation des scores PDI, hPDI et uPDI (d'après Satija et al., 2016)

	Overall plant-based diet index (PDI) (18-90 points)	**Healthy plant-based diet index (hPDI) (18-90 points)**	**Unhealthy plant-based diet index (uPDI) (18-90 points)**
	Groupes d'aliments d'origine végétale		
Aliments considérés favorables à la santé			
Céréales complètes	Décompte croissant[1]	Décompte croissant	Décompte décroissant[2]
Fruits	Décompte croissant	Décompte croissant	Décompte décroissant
Légumes	Décompte croissant	Décompte croissant	Décompte décroissant
Fruits à coque	Décompte croissant	Décompte croissant	Décompte décroissant
Légumineuses	Décompte croissant	Décompte croissant	Décompte décroissant
Huiles végétales	Décompte croissant	Décompte croissant	Décompte décroissant
Thé et café	Décompte croissant	Décompte croissant	Décompte décroissant
Aliments considérés peu favorables à la santé			
Jus de fruits	Décompte croissant	Décompte décroissant	Décompte croissant
Céréales raffinées	Décompte croissant	Décompte décroissant	Décompte croissant
Pommes de terre	Décompte croissant	Décompte décroissant	Décompte croissant
Boissons sucrées	Décompte croissant	Décompte décroissant	Décompte croissant
Produits sucrés	Décompte croissant	Décompte décroissant	Décompte croissant
	Groupes d'aliments d'origine animale		
Graisses animales	Décompte décroissant	Décompte décroissant	Décompte décroissant
Produits laitiers	Décompte décroissant	Décompte décroissant	Décompte décroissant
Oeufs	Décompte décroissant	Décompte décroissant	Décompte décroissant
Produits de la mer	Décompte décroissant	Décompte décroissant	Décompte décroissant
Viande	Décompte décroissant	Décompte décroissant	Décompte décroissant
Produits divers à base de produits animaux	Décompte décroissant	Décompte décroissant	Décompte décroissant

[1] Plus l'individu est dans un quintile élevé de consommation, plus il reçoit des points (1er quintile=1 point ; 2ème quintile=2 points ; … ; 5ème quintile = 5 points)
[2] Plus l'individu est dans un quintile élevé de consommation, moins il reçoit des points (1er quintile=5 points ; 2ème quintile=4 points ; … ; 5ème quintile = 1 point)

A partir des données de trois cohortes américaines (Nurses' Health Study (NHS), n=69 949 femmes, Nurses' Health Study 2 (NHS2), n=90 239 femmes, Health Professionals Follow-Up Study (HPFS), n=40 539 hommes), les associations entre les scores PDI, hPDI et uPDI et l'incidence de diabètes de type 2 ont été étudiées (Satija et al., 2016). Par rapport au 1er décile, les individus dans le 10ème décile du PDI ou du hPDI avaient un moindre risque de diabète de type 2 (HR : 0,80 [95%CI 0,74-0,87] pour le PDI ; HR : 0,66 [95%CI 0,61-0,72] pour le hPDI) alors que le risque était augmenté pour un niveau élevé (10ème décile) du uPDI (HR : 1,16 [95%CI 1,08-1,25]), indépendamment de l'IMC et d'autres facteurs de risques de diabète (**Figure 16**)(Satija et al., 2016). A partir des mêmes cohortes (NHS, n=73 710 femmes, NHS2, n=92 329 femmes et HPFS, n=43 259 hommes), les associations entre ces trois scores et l'incidence de maladie coronarienne ont été étudiées (Satija et al., 2017). De manière similaire, une plus forte adhésion (10ème vs 1er décile) au PDI ou hPDI était inversement associée au risque de maladie coronarienne (HR : 0,92 [95%CI 0,83-1,01] pour le PDI ; HR : 0,75 [95%CI 0,68-0,83] pour le hPDI), et l'inverse était observée pour le uPDI (HR : 1,32 [95%CI 1,20-1,46]) (Satija et al., 2017).

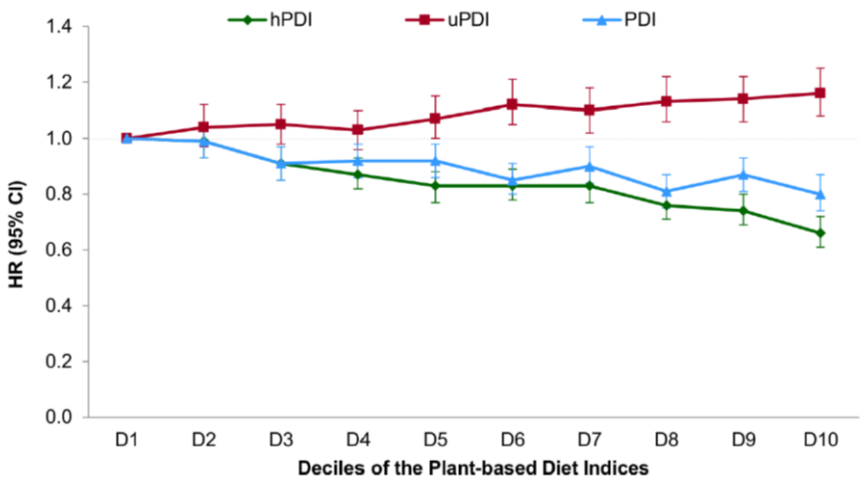


Figure 16: Hazard ratios (HR) et intervalles de confiances à 95% pour le risque de diabète de type 2 en fonction des déciles des scores PDI, hPDI et uPDI dans les cohortes NHS (n=69 949), NHS2 (n=90 239) et HPFS (n=40 539) (extrait de Satija et al., 2016)

Les associations entre ces scores et la mortalité ont également été étudiées (Baden et al., 2019; Kim et al., 2018). A partir de la cohorte NHANES III (1988-1994, n=11 879), une augmentation de 10 points du hPDI était associée avec une réduction de 5% [95%CI 0,91-0,98] de la mortalité toute cause chez les individus ayant un score hPDI supérieur à la médiane (moindre mortalité de 6% [95%CI 0,88-0,99] chez les femmes et pas d'association chez les hommes). Le PDI et le uPDI n'étaient pas associée à la mortalité toute cause et aucune association n'a été trouvé entre un de ces trois scores et la mortalité cardiovasculaire (Kim et al., 2018). De même, à partir de l'étude ARIC (Atherosclerosis Risk in Communities) (n=12 168 adultes de 45-64 ans), une valeur plus élevée du PDI (5e vs 1er quintile) était associée à un risque réduit de 16% [95%CI 0,75-0,92] de maladie cardiovasculaire, de 32% [95%CI 0,58-0,80] de mortalité cardiovasculaire et de 25% [95%CI 0,69-0,82] de mortalité toute cause, et une valeur plus élevée du hPDI était associée à un risque réduit de 19% [95%CI 0,68-0,97] de mortalité cardiovasculaire et de 11% [95%CI 0,81-0,98] de mortalité toute cause, mais il n'y avait pas d'association avec l'incidence de maladie cardiovasculaire. Aucune association n'était observée entre le uPDI et l'incidence de maladies cardiovasculaires, la mortalité cardiovasculaire ou la mortalité toute cause (Kim et al., 2019). Une autre étude a évalué les associations entre l'évolution sur 12 ans (1986-1998) de la qualité des régimes végétalisés (à partir de l'évolution des scores PDI) et la mortalité dans les cohortes NHS (n=49 407 femmes) et HPFS (n=25 907 hommes) (Baden et al., 2019). Une augmentation de 10 points sur 12 ans du PDI était associée à un moindre risque de mortalité toute cause (HR : 0,92 [95%CI 0,89-0,95]), par maladie cardiovasculaire (HR : 0,93 [95%CI 0,88-0,99]) et par cancer (HR : 0,93 [95%CI 0,89-0,98]). Une augmentation de 10 points sur 12 ans du hPDI était associée à un moindre risque de mortalité toute cause (HR : 0,90 [95%CI 0,88-0,93]) et par maladie cardiovasculaire (HR : 0,91 [95%CI 0,86-0,96]) mais pas par cancer. Inversement, une augmentation de 10 points sur 12 ans du uPDI était associée à une augmentation de la mortalité toute cause (HR : 1,09 [95%CI 1,06-1,12]) et par maladie cardiovasculaire (HR : 1,08 [95%CI 1,02-1,14]) mais par pas cancer (Baden et al., 2019). Ainsi, ces études nous montrent que tous les régimes végétalisés ne se valent pas et que ceux basés sur des groupes d'aliments sains seraient plus favorables à la santé.

Dans l'étude NutriNet-Santé (n=21 212), Gehring et al. ont étudié la consommation d'aliments ultra-transformés (AUT) en fonction du régime alimentaire (Gehring et al., 2021). La contribution des AUT à l'apport énergétique était plus importante pour les ovo-lacto-végétariens et les végétaliens, respectivement 37,0% et 39,5% que pour les omnivores et les pesco-végétariens, respectivement 33,0% et 32,5% (**Figure 17**). Chez les végétaliens, 42,0% de l'apport énergétique provenant des AUT venait de la consommation de substituts végétaux (protéines de soja texturées, galettes végétales et boissons végétales), alors que ces aliments ne représentaient que 3,4% de l'apport énergétique des AUT pour les omnivores. Cependant, chez les végétaliens, les aliments peu transformés contribuaient également plus à l'apport énergétique que chez les omnivores (31,2% vs 29,0%). Plus le régime était restrictif, plus le score hPDI était élevé (67,9 pour les végétaliens vs 53,5 pour les omnivores) mais également le score uPDI (59,9 pour les végétaliens vs 54,0 pour les omnivores).

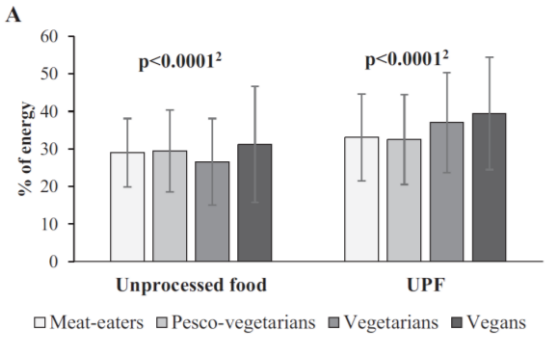


Figure 17: Proportion de l'apport énergétique provenant des aliments peu transformés (unprocessed foods) et ultra-transformés (UPF) en fonction du régime alimentaire dans la cohorte NutriNet-Santé (2014-2018, n=21 212). [1]Les valeurs sont les moyennes ± écart-type. [2]P de l'ANOVA (extrait de Gehring et al., 2021)

Finalement, nous avons vu que les régimes végétalisés seraient bénéfiques pour la santé, en apportant des nutriments insuffisamment consommés, en limitant les apports d'autres nutriments à limiter, et en réduisant le risque de certaines maladies non-transmissibles. Pour certains nutriments importants, les apports seraient en revanche plus faibles, mais le risque de carence semble plus associé aux régimes très restrictifs, comme le régime végétalien qu'à des régimes sans exclusion. L'effet protecteur des régimes végétalisés sur la santé à long-terme pourrait cependant dépendre de la nature des aliments végétaux consommés. Nous avons également vu que l'exclusion de la consommation de produits animaux étaient associée à une consommation plus importante d'aliments ultra-transformés, notamment par la consommation de substituts végétaux. Dans la prochaine partie nous nous focaliserons ainsi sur le sujet des substituts végétaux.

Messages clés de la deuxième partie de l'introduction

- Les protéines alimentaires sont essentielles à l'organisme et peuvent être apportées par des aliments d'origine animale (viande, poisson, œuf, etc.) ou d'origine végétale (légumineuses, céréales complètes, fruits à coque, etc.)
- Les aliments sources de protéines animales et végétales n'apportent pas les mêmes nutriments et les profils d'apports nutritionnels varient en fonction des aliments protéiques consommés et des régimes alimentaires.
- Végétaliser son alimentation permettrait de réduire les apports des nutriments consommés en excès et d'augmenter les apports en nutriments actuellement insuffisamment consommés.
- La consommation de protéines animales ou d'aliments protéiques d'origine animale est associée à un risque plus élevé de maladies non-transmissibles et de mortalité, et plus spécifiquement la consommation de viande rouge ou de charcuterie.
- A l'inverse, les régimes caractérisés par une consommation plus faible ou une exclusion de produits animaux semblent associés à un moindre risque de maladies non-transmissibles et de mortalité.
- Cependant, les associations entre régime végétalisé et risque de maladies non-transmissible et de mortalité semblent dépendre de la nature des aliments végétaux consommés.
- Les populations végétariennes, et plus particulièrement végétaliennes, ont des prévalences d'inadéquation d'apport plus élevées pour certains nutriments (essentiellement vitamine B12, iode, fer, zinc et calcium) par rapport aux populations non-végétariennes. De même, ces populations auraient de moins bons statuts en micronutriments, évalués par des marqueurs biologiques.
- Les végétariens pourraient consommer plus de produits ultra-transformés que les non-végétariens du fait d'une consommation plus importante de substituts végétaux.

3. Emergence de nouveaux produits pour remplacer les produits animaux : les substituts végétaux

3.1. Définition des substituts végétaux

Définition et réglementation autour des substituts végétaux

Il existe des alternatives entièrement végétales pour de nombreux produits d'origine animale : viande, lait, yaourt, fromage, beurre, produits de la mer, œufs mais également pour des produits transformés habituellement composés de produits animaux (crème glacée, plats préparés, …) (ProVeg International, 2020). D'après un sondage en ligne de 6 221 consommateurs de substituts végétaux dans neuf pays Européens, les alternatives au lait, à la viande et au yaourt sont les catégories de substituts les plus consommés (respectivement consommés par 93%, 81% et 73% des répondants) (ProVeg International, 2020), nous nous concentrerons donc uniquement sur ces substituts. Différents noms peuvent être employés pour désigner les produits végétariens cherchant à imiter la viande ou les produits laitiers. Ici, nous emploierons le terme « substitut végétal » pour désigner l'ensemble de ces produits.

La Cour de Justice Européenne a statué en 2017 que « *La dénomination « lait » est réservée exclusivement au produit de la sécrétion mammaire normale, obtenu par une ou plusieurs traites, sans aucune addition ni soustraction* » et que « *on entend par « produits laitiers », les produits dérivés exclusivement du lait, étant entendu que des substances nécessaires pour leur fabrication peuvent être ajoutées, pourvu que ces substances ne soient pas utilisées en vue de remplacer, en tout ou partie, l'un quelconque des constituants du lait* ». Ainsi, les termes lait, crème, beurre, fromage, yaourt sont exclusivement réservés aux produits laitiers et ne peuvent pas être utilisés pour les produits végétaux cherchant à imiter ces produits (Cour de Justice Européenne, 2017). Les appellations « lait de soja » ou « yaourt au soja » ne sont donc pas autorisées, et nous utiliserons les termes « boisson végétale » et « dessert végétal » pour désigner respectivement les produits végétaux imitant le lait et les yaourts et autres desserts lactés.

Concernant les substituts végétaux à la viande, après l'adoption le 27 mai 2020 de la loi n°2020-699 du 10 juin 2020 relative à la transparence de l'information sur les produits agricoles et alimentaires, le code de la consommation est complété de l'article L.412-10 spécifiant : « *Les dénominations utilisées pour désigner des denrées alimentaires d'origine animale ne peuvent être utilisées pour décrire, commercialiser ou promouvoir des denrées alimentaires comportant des protéines végétales. Un décret fixe la part de protéines végétales au-delà de laquelle cette dénomination n'est pas possible. Ce décret définit également les modalités d'application du présent article et les sanctions encourues en cas de manquement* » (République Française, 2020). Ainsi, au niveau de la réglementation française, il n'est pas possible d'utiliser les termes « steaks », « saucisses » etc. pour les substituts végétaux. En revanche, l'Union Européenne n'a pas interdit l'utilisation des termes carnés pour les produits végétaux lors de l'adoption de la nouvelle Politique Agricole Commune en octobre 2020 (Cérou, 2020). Nous utiliserons au maximum les termes « substituts de viande » par la suite, mais par souci de simplification, nous pourrons être amenés à utiliser les termes « steak », « saucisse » ou autre pour désigner les produits végétaux imitant les caractéristiques des steaks, saucisses ou autre produit d'origine animale.

Les substituts de viande

Il existe différentes variétés de substituts de viande que l'on peut catégoriser en fonction de leur degré de ressemblance à la viande (Exemples présentés dans le **Tableau 3**).

Tableau 3: Liste d'ingrédients d'une sélection de substituts de viande

Intitulé du produit	Marque	Ingrédients
Tofu, tempeh, seitan		
Tofu	Bjorg	Eau, fèves de soja, gélifiant : chlorure de magnésium.
Tempeh	Soy	Soja décortiqué précuit, vinaigre de cidre, ferments.
Seitan	Bjorg	Eau, gluten de blé, farine de blé, sauce soja, tomates, ail, sel marin, gingembre, feuilles de laurier, thym.
Galettes végétales		
Galettes Lentilles vertes Courgette - Menthe	HARI&CO	Lentilles vertes, semoule de maïs, courgettes, huile de tournesol, flocons de blé, amidon de maïs, farine de blé, sel marin, menthe, ail, poivre noir.
Galettes Quinoa & Boulghour à la tomate	Céréal Bio	Boulgour de blé complet réhydraté, quinoa cuit, huiles végétales, poivrons rouges, oignons, flocons de blé complet, flocons d'avoine complète, concentré de tomate, farine de riz, maïs, épices Chili, ail, sel de mer, gluten de blé, betteraves rouges en poudre, cacao maigre en poudre.
Croc Tofou Poivrons & Brebis au piment d'Espelette	Croc Tofou	Tofu, poivrons verts et rouges, flocons d'avoine complète, fromage de brebis, farine de blé, concentré de tomates, sel de mer, plantes aromatiques, huile de tournesol.
Analogues végétaux		
Steak Cru Soja	Herta	Protéines de soja réhydratées, eau, huiles végétales, vinaigre d'alcool, arômes, stabilisant (méthylcellulose), concentrés végétaux (pomme, betterave, carotte, hibiscus), sel, extrait de malt d'orge en poudre.
Beyond Burger	Beyond Meat	Eau, protéines de pois, huile de canola, huile de noix de coco, protéines de riz, arômes naturels, levure sèche ; beurre de cacao, méthylcellulose, amidon de pomme de terre, sel, chlorure de potassium, jus de betterave, extrait de pomme, concentré de grenade, lécithine de tournesol, vinaigre, concentré de jus de citron, vitamines et minéraux
Escalope grillée soja & blé	Herta	Protéines de soja réhydratées, eau, protéines de blé réhydratées, huiles végétales (colza, tournesol), farine (blé, riz), oignons, blanc d'œuf en poudre, amidon, épices et plantes aromatiques, purée de pommes, fibres d'agrumes, vinaigre, sel, extrait de levure, levure, arômes, protéines hydrolysées (maïs, soja), extrait d'épices (poivre noir).
Chipos végétales aux herbes de Provence	Les nouveaux fermiers	Eau, huile de tournesol, protéines de pois, protéines de fèves, méthylcellulose, herbes aromatiques, épices, fibres végétales, extraits d'épices, vinaigre, amidon de pomme de terre, arômes naturels, maltodextrine, colorant : extrait de betterave rouge, antioxydant : extrait de romarin. Enveloppe végétale : gélifiant : alginate de calcium.

Le tofu, le tempeh et le seitan sont des aliments traditionnels et anciens des cultures asiatiques et peuvent être considérés comme des substituts de viande. Le tofu résulte de la coagulation de graines de soja broyées et extraites dans l'eau et a un goût relativement neutre alors que le tempeh, originaire d'Indonésie, est un bloc de graines de soja fermentées et a un goût plus prononcé et une texture plus ferme que le tofu. Le seitan est lui obtenu à partir du blé et est formé par agglomération du gluten (Malav et al., 2015). Ces produits, tout comme le soja sont consommés depuis plusieurs siècles, voire millénaires en Asie et commencent depuis plusieurs dizaines d'années à devenir populaire dans les pays occidentaux (Bohrer, 2019; Rizzo & Baroni, 2018; Sadler, 2004), même si leur consommation reste principalement cantonnée aux végétariens (Rizzo & Baroni, 2018). Cependant, ces produits ont des propriétés organoleptiques (goût, odeur, texture, …) très différentes de la viande (H. J. Lee et al., 2020) et le développement des technologies alimentaires au XXème siècle a permis de développer de nouveaux produits plus ressemblants à la viande, qui ont vocation à ne pas être uniquement destinés aux végétariens (Bohrer, 2019; Sadler, 2004).

Une gamme de substituts végétaux s'est développée avec des produits cherchant à conserver le même usage que la viande, et principalement que le steak haché, avec une forme et une cuisson similaire. Ces produits sont généralement identifiés comme des galettes végétales et peuvent contenir une grande variété d'ingrédients comme du tofu, des céréales, des légumineuses, des légumes et parfois du fromage. L'imitation de la couleur, l'odeur ou le goût

de la viande n'est pas nécessairement recherché et les ingrédients peuvent rester apparents et distinguables les uns des autres. La dernière catégorie de substituts végétaux que l'on peut trouver sur le marché correspond à des produits cherchant à reproduire au maximum les propriétés organoleptiques de certains produits carnés comme les steaks hachés, les saucisses, les émincés de poulet ou des produits panés (Boukid, 2020). La recherche et développement de ces produits, que l'on peut appeler « analogues végétaux », se focalise sur les ingrédients et les procédés à utiliser pour imiter le mieux possible la viande (Choudhury et al., 2020).

Dans ces produits, les ingrédients utilisés ont à la fois un rôle nutritionnel et technologique pour reproduire au mieux les propriétés nutritionnelles et organoleptiques de la viande (Bohrer, 2019). De nombreux ingrédients peuvent être utilisés comme des légumes secs, des céréales, des fruits à coque ou des légumes, ou des mycoprotéines (une protéine de champignon) (Bohrer, 2019; Malav et al., 2015; Sadler, 2004). En général, le soja, le blé et le pois sont les ingrédients protéiques les plus utilisés (Boukid, 2020; Malav et al., 2015; Sadler, 2004) et permettent, en plus d'obtenir des quantités de protéines similaires à la viande, de structurer les produits grâce à leurs propriétés de solubilisation, d'hydratation, d'émulsifiant et de liant (Bohrer, 2019; Boukid, 2020). Le soja présente une bonne composition en acides aminés indispensables, de bonnes propriétés technologiques et peut être utilisé sous forme de farine (environ 50% de protéines en matière sèche), de concentré de protéines (environ 70% de protéines) ou d'isolats de protéines (environ 90% de protéines). Ces protéines peuvent être texturées par des procédés d'extrusion ou de filage ce qui permet de leur donner une texture fibreuse ressemblant à celle de la viande (Malav et al., 2015; Sadler, 2004). De plus, les protéines issues d'isolats ou de concentrés de soja auraient une meilleure digestibilité que les formes de soja moins transformées (Bohrer, 2019). Les céréales peuvent être utilisées sous la forme de graines, de farines de flocons ou d'isolats (Bohrer, 2019; Malav et al., 2015). Plus particulièrement, les protéines de blé ont des propriétés viscoélastiques intéressantes qui permettent d'obtenir une texture fibreuse similaire à la viande (Bohrer, 2019; Boukid, 2020).

Afin d'imiter la composition nutritionnelle et la texture de la viande, les substituts de viande contiennent également des matières grasses et peuvent ainsi contenir des quantités de lipides similaires à la viande (Bohrer, 2019). Les matières grasses ont un rôle essentiel car elles permettent de fixer les arômes et de reproduire une texture en bouche similaire à la viande (Bohrer, 2019; Boukid, 2020). Les principales matières grasses utilisées sont l'huile de colza, de coco, de tournesol, de maïs, de sésame ou le beurre de cacao (Bohrer, 2019). Les substituts contiennent aussi des ingrédients glucidiques tels que des amidons, farines ou fibres ou des agents liants, comme des gommes ou de la méthylcellulose. Ces ingrédients permettent d'améliorer la texture et la consistance du produit en retenant l'eau et en ayant un rôle épaississant (Bohrer, 2019; Boukid, 2020). Les substituts de viande contiennent également des arômes et des colorants, dans l'objectif de reproduire l'odeur, le goût et la couleur de la viande (Bohrer, 2019; Boukid, 2020). Du jus de betterave ou du concentré de tomates peuvent être utilisés pour reproduire la couleur rouge de la viande, mais cela ne permet pas de reproduire le changement de couleur (de rouge à brun) à la cuisson de la viande rouge, qui est lié à la présence de myoglobine dans la viande. L'utilisation de leghémoglobine dans les substituts de viande permet de mieux reproduire la couleur de la viande et contribue également à donner un goût plus proche de celui de la viande (H. J. Lee et al., 2020). Certains substituts sont également enrichis en micronutriments pour améliorer les propriétés nutritionnelles du substitut (Boukid, 2020). Finalement, comme la plupart de ces ingrédients

sont secs, de l'eau est également ajoutée à hauteur de 50 à 80% de la quantité totale du produit (H. J. Lee et al., 2020).

Tous ces ingrédients sont ensuite assemblés et le mélange est émulsionné et cuit afin de former un réseau de protéines puis mis en forme (Malav et al., 2015). L'extrusion (procédé de fabrication qui permet de mettre en forme des produits par une combinaison de malaxage, compression, et éventuellement traitement thermique) est une des techniques les plus utilisées, mais des procédés de cisaillement et de filage peuvent également être mis en place (Boukid, 2020; Kyriakopoulou et al., 2019; Malav et al., 2015). Ainsi, de par l'utilisation d'ingrédients issus de la décomposition d'ingrédients bruts et de l'utilisation de procédés de transformation importants, les substituts végétaux peuvent généralement être considérés comme des produits ultra-transformés, d'après la classification NOVA (Boukid, 2020; Monteiro, Cannon, Levy, et al., 2019)

Il existe d'autres alternatives à la viande tels que les insectes, sous forme entière ou sous forme de farine incorporée dans des aliments, et la viande in vitro, ou viande cultivée, produite à partir de la culture de cellules musculaires d'animaux (H. J. Lee et al., 2020). Mais ces produits ne sont pas ou peu commercialisés et nous nous focaliserons ici uniquement sur les substituts à base d'ingrédients végétaux.

Les substituts de produits laitiers : boissons et desserts végétaux

Les boissons végétales peuvent être à base de céréales (avoine, riz), de légumineuses (soja), de fruits à coque (amande, noix de coco), de graines (sésame) ou de pseudo-céréales (quinoa) (Sethi et al., 2016). Elles sont fabriquées à partir de l'extraction dans de l'eau d'ingrédients végétaux (Mäkinen et al., 2016; Sethi et al., 2016). Les ingrédients sont généralement mis à tremper dans de l'eau puis broyés, ou sont d'abord broyés puis mélangés à de l'eau (Mäkinen et al., 2016; Sethi et al., 2016). Le mélange obtenue est filtré puis homogénéisé pour que la taille des particules permette de reproduire l'apparence et la consistance du lait de vache (Sethi et al., 2016). Certains ingrédients peuvent être ajoutés à cette étape pour obtenir une boisson sucrée ou aromatisée ou pour enrichir la boisson en certains nutriments. La boisson est ensuite pasteurisée pour garantir sa conservation (Mäkinen et al., 2016). En suivant un procédé similaire et en ajoutant une étape de fermentation au moyen de bactéries lactiques, il est également possible d'obtenir des produits similaires aux yaourts ou autres desserts lactés (Mäkinen et al., 2016).

3.2. Evolution de leur consommation dans les pays occidentaux

Consommation de substituts végétaux

Des motivations éthiques, environnementales ou de santé peuvent mener à la consommation de substituts végétaux (Boukid, 2020; Sadler, 2004). Concernant les boissons et desserts végétaux, ces produits offrent également une alternative aux produits laitiers pour les individus qui sont intolérants au lactose ou allergiques au lait (Mäkinen et al., 2016; Sethi et al., 2016).

Dans l'enquête INCA3, 4,1% des adultes avaient déclaré sur leurs jours de recueil une consommation de « substituts de produits animaux à base de soja et autres végétaux », cette catégorie incluant les substituts de viande, les boissons et desserts végétaux (Anses, 2017). Mais l'enquête INCA3 date de 2014-2015 et la consommation a pu rapidement évoluer depuis.

Ainsi, selon la dernière enquête IFOP/FranceAgriMer (n=15 000), 23% des français consomment des substituts végétaux (définis dans l'étude comme « nouveaux produits végétariens/végétaux que l'on peut trouver dans les supermarchés/hypermarchés (type galettes de céréales, « steak » de soja, … »)). (Crouzet et al., 2021). Plus spécifiquement, 39% des flexitariens déclarés en consomment ainsi que 65% des individus suivant un régime sans viande (pesco-végétarien, lacto-ovo-végétarien, végétalien) mais il est intéressant de noter que 17% des omnivores en consomment également. 52% des consommateurs trouvent que ces produits sont faciles à cuisiner, 43% les trouvent bons au goût et 41% les considèrent bons pour la santé. En revanche, ils sont 42% à les trouver plus chers que les produits non végétariens (Crouzet et al., 2021).

Dans l'étude UK Biobank (n=199 944), les lacto-ovo-végétariens et végétaliens consommaient environ 45-65g/jour de substituts de viande, les pesco-végétariens et semi-végétariens (consommant uniquement de la volaille) en consommaient environ 15-40g/jour alors que les consommateurs de viande n'en consommaient que 1-3g/jour (Kathryn Bradbury et al., 2017). Dans la cohorte AHS-2 (n=89 455), les végétaliens, lacto-ovo-végétariens et pesco-végétariens consommaient environ 80g/jour de soja, tofu ou autres substituts de viande, les semi-végétariens 70g/jour et les non-végétariens 44g/jour (Orlich et al., 2014). Dans l'étude NutriNet-Santé (n=93 823), les végétaliens consommaient 73g/jour de substituts de viande (produits à base de protéines de soja texturées et galettes végétales), les lacto-ovo-végétariens 27g/jour et les non-végétariens 3g/jour (Allès et al., 2017). Dans ces études, la consommation de boissons végétales était également plus importante à mesure que le régime était plus restrictif (Allès et al., 2017; Kathryn Bradbury et al., 2017; Orlich et al., 2014). Au sein d'un même pays, la consommation peut cependant varier en fonction des différences culturelles. Ainsi, dans une étude évaluant les rapports à la consommation de viande dans deux populations des Pays-Bas (357 néerlandais natifs et 350 néerlandais issus de l'immigration chinoise), 79% des néerlandais d'origine chinoise déclaraient consommer des substituts de viande (incluant le tofu) contre seulement 25% des néerlandais natifs (de Boer et al., 2017).

Ainsi, on peut voir que les végétaliens sont ceux qui consomment le plus de substituts végétaux, mais que ces produits sont consommés, même en très faible quantité, quel que soit le régime alimentaire. Ces produits sont de plus en plus consommés et le marché des substituts végétaux est en pleine expansion et devrait continuer à croître dans les années à venir (Boukid, 2020; Choudhury et al., 2020). Cependant, comme nous l'avons vu dans la première partie, il existe des freins à réduire sa consommation de viande et à consommer des produits végétaux, mais les substituts végétaux pourraient jouer un rôle crucial pour lever certains freins.

Acceptabilité de la consommation de substituts végétaux

Dans une étude aux Pays-Bas où il était demandé aux participants par quoi ils substituaient la viande pendant les repas où ils n'en mangeaient pas, les participants citaient dans l'ordre décroissant : le poisson, les œufs, le fromage, les substituts végétaux préparés, les légumes secs, les fruits à coque, le seitan, le tempeh et le tofu (Schösler et al., 2012). Ainsi, les participants substituent préférentiellement la viande par d'autres produits animaux mais on constate également que les substituts végétaux sont les premiers produits végétaux utilisés comme substitut de la viande. Les substituts traditionnels comme le tofu, tempeh ou seitan sont en revanche peu plébiscités. Les substituts végétaux permettent en effet de remplacer la viande sans modifier la structure de l'assiette, et permettent de facilement adapter un plat pour

quelqu'un qui ne mange pas de viande lors d'un repas à plusieurs (Schösler et al., 2012). En effet, nous avions vu dans la première partie qu'un des freins à la consommation de produits végétaux était le manque de connaissance sur la manière de les consommer et les cuisiner (Figueira et al., 2019; Niva et al., 2017). Puisque les substituts végétaux se consomment comme les produits animaux, ils pourraient être plus facilement incorporés dans les habitudes alimentaires.

D'après une revue de la littérature, les alternatives à la viande (légumineuses, algues, insectes, substituts végétaux et viande in vitro) auraient un faible niveau d'acceptabilité en comparaison à la viande (Onwezen et al., 2021). Les substituts végétaux de viande seraient toutefois l'alternative considérée comme la plus acceptable, à l'opposé des insectes et de la viande in vitro. Il y a cependant des différences en fonction des profils de consommateurs et les gros consommateurs de viande seraient plus ouverts à la viande in vitro et aux produits ressemblant le plus à la viande alors que les individus ayant un faible attachement à la viande (suivant un régime végétarien par exemple) auraient des préférences plus marquées pour les substituts végétaux. De mêmes, les personnes jeunes, avec un niveau d'études élevé, non conservateur d'un point de vue politique, vivant en milieu urbain ou étant végétarien seraient plus aptes à consommer des alternatives à la viande (Onwezen et al., 2021).

Dans un sondage mené au Royaume-Uni et aux Pays-Bas (n=553), il a été montré que moins un individu consommait de substituts de viande, plus il attendait que ses caractéristiques sensorielles (texture, goût, apparence et odeur) soient proches de celles de la viande, alors que les consommateurs réguliers de substituts préféraient plutôt des produits s'éloignant des caractéristiques de la viande (Hoek et al., 2011). De même, d'après un sondage en ligne mené en Allemagne (n=1039) (Michel et al., 2021), les participants auraient tendance à attendre des substituts végétaux qu'ils aient le même goût que la viande. En effet, le goût est un paramètre essentiel puisqu'il est un des principal facteur dans les prises de décisions alimentaires et qu'un consommateur n'achètera surement pas un produit s'il considère qu'il ne sera pas bon (Szejda et al., 2020). Il est cependant intéressant de constater qu'il y a une opposition entre les individus attachés à la viande qui attendent de retrouver dans les substituts végétaux un goût similaire à la viande et à l'opposé les individus peu attachés à la viande et à son goût et qui sont prêts à découvrir de nouvelles saveurs. Quelles que soit les attentes des consommateurs en matière de proximité avec la viande, de bonnes caractéristiques sensorielles des produits sont essentiels pour favoriser leur adoption sur le long-terme (Weinrich, 2019).

Le manque de familiarité avec ces produits, mais également la réticence à goûter de nouveaux produits sont également des barrières à la consommation des substituts végétaux (Hoek et al., 2011; Szejda et al., 2020). En effet, d'après une enquête menée entre 2017 et 2019 sur 3091 participants de neuf pays différents, la volonté de consommer des substituts végétaux de viande est contrecarrée par des comportements associés à de la néophobie alimentaire et néophobie des technologies alimentaires (de Koning et al., 2020). C'est pourquoi les fabricants cherchent à développer des produits imitant le goût et l'odeur de la viande et à montrer que ces produits peuvent être facilement inclus dans un repas, afin d'élargir la gamme des consommateurs (Szejda et al., 2020). D'un autre côté, la curiosité et l'envie de découvrir de nouveaux produits apparaît également comme un levier pour la consommation de substituts végétaux (ProVeg International, 2020) et l'appréciation des substituts végétaux pourrait être augmentée avec des expositions et consommations répétées (Hoek et al., 2013). Le coût des substituts végétaux serait également un frein à leur consommation puisque les

consommateurs ont tendance à trouver les prix élevés dans l'absolu et relativement aux produits animaux qu'ils visent à remplacer (Crouzet et al., 2021; Szejda et al., 2020). D'autres facteurs influencent également le choix des consommateurs vers ces produits comme la praticité de consommation ou des enjeux de santé, d'environnement ou d'éthique (de Koning et al., 2020; Szejda et al., 2020; Weinrich, 2019).

Il est également intéressant de noter que les différences d'appréciation entre produits carnés et substituts végétaux sont plus marquées sur les produits peu transformés (comme le steak) que sur les produits transformés (nuggets, saucisses) (Michel et al., 2021). Ainsi, il serait peut-être plus acceptable de remplacer des nuggets, cordon-bleu ou saucisses par des substituts végétaux, plutôt qu'une entrecôte de bœuf. De même, l'acceptabilité des substituts dépendrait des moments de consommation et il semblerait plus approprié de consommer des substituts végétaux lors d'un repas seul ou un repas entre amis ou famille en semaine, plutôt qu'à l'occasion d'un repas familial le week-end, d'un repas au restaurant, d'un repas d'affaire ou d'un barbecue (Michel et al., 2021).

Ainsi, les substituts végétaux semblent être une des alternatives les plus acceptables à la viande, du fait de leur facilité de consommation et d'incorporation dans un repas. Les néo-consommateurs semblent attendre de ces produits une ressemblance proche avec la viande et concevoir des produits familiers pourrait ainsi favoriser leur consommation. Les consommateurs peu attachés à la viande seraient en revanche plus ouverts à des produits ne reproduisant pas le goût de la viande. Finalement, la qualité nutritionnelle perçue des substituts végétaux serait à la fois un levier et un frein à leur consommation (de Koning et al., 2020; Szejda et al., 2020). Comme ces produits sont d'origine végétale, les consommateurs ont tendance à considérer qu'ils sont sains et bons pour la santé mais il y a également une crainte que ces produits ne contiennent pas assez de protéines ou d'autres nutriments importants apportés par la viande (de Koning et al., 2020; Szejda et al., 2020). Ainsi, nous allons nous focaliser sur cet aspect dans la prochaine sous-partie.

3.3. Qualité nutritionnelle des substituts végétaux

Qualité nutritionnelle des substituts de viande

De Marchi et al. ont analysé la composition nutritionnelle de steaks hachés de viande et de trois « steaks » végétaux issus de marques cherchant à reproduire le plus possible les propriétés organoleptiques de la viande (Beyond Burger, Incredible Burger et Planty of Burger) (De Marchi et al., 2021). Dans les « steaks » végétaux, par rapport au steak de viande, une plus grande teneur en glucides et en fibres a été mesurée ainsi qu'une plus grande quantité de minéraux et notamment de potassium (350 vs 250 mg/100g de produit cru), phosphore (210 vs 130 mg/100g), magnésium (62 vs 16 mg/100g), calcium (72 vs 9 mg/100g), fer (2.7 vs 1.3 mg/100g), cuivre (0.4 vs 0.2 mg/100g), manganèse (1.5 vs 0.02 mg/100g). En revanche, les « steaks » végétaux contenaient moins de zinc (2.1 vs 3.1 mg/100g) et une quantité similaire de sodium (430 mg/100g environ). Les teneurs en protéines ne différaient pas entre les deux catégories de produits (environ 18g/100g de produit cru), mais il y avait une différence sur la teneur en cinq acides aminés (moins de méthionine, glycine et alanine dans les « steaks » végétaux mais plus de cystéine et d'acide glutamique). Il n'y avait également pas de différence sur la teneur en lipides et en acides gras saturés mais moins d'acides gras

monoinsaturés et de cholestérol et plus d'acides gras polyinsaturés pour les « steaks » végétaux comparé au steak haché. La quantité en acides gras saturés dans les produits végétaux pouvait notamment s'expliquer par la présence d'huile de coco. Ainsi, ces analyses montrent que comparé à un steak haché, les produits végétaux contiennent une quantité similaire de protéines, de lipides et d'acides gras saturés, mais plus de fibres et de minéraux (De Marchi et al., 2021). Bohrer a comparé la composition nutritionnelle de certains substituts de viande (7 références) avec les produits animaux qu'ils visent à imiter (5 références) (Bohrer, 2019). En général, les substituts sont moins caloriques, contiennent une quantité similaire de protéines et de sodium, contiennent plus de fibres et moins de lipides et d'acides gras saturés, mais cela varie en fonction des substituts et aussi du produit animal imité. Par exemple, le « steak » de Beyond Burger contient 5,3 g d'acides gras saturés, et celui de Impossible Foods 7,1 g alors que les autres substituts contiennent moins de 2 g d'acides gras saturés. Le « jambon » végétal contient environ 2 fois moins de sodium que le jambon de porc, alors que pour les autres substituts, les teneurs sont généralement similaires entre le substitut et l'aliment imité. Les substituts contenaient également plus de fer que leur équivalent animal. Cependant, ces analyses se basent sur un nombre limité de produits, et il semblerait qu'il y ait une grande diversité de substituts végétaux ce qui limiterait la généralisation de ces résultats. Ainsi, il est nécessaire d'étudier un plus grand nombre de produits.

Curtain et Grafenauer ont relevé la composition nutritionnelle indiquée sur les emballages de 137 substituts de viande (dont 50 « steaks », 29 « saucisses », 10 « émincés » et 24 produits imitant le poulet ou les produits panés au poulet) présents dans les supermarchés australiens (Curtain & Grafenauer, 2019). La composition des produits a été analysée par catégorie de substituts. Chaque catégorie avait un score Health Star Rating (système de notation australien de la qualité nutritionnelle, analogue au Nutri-score) plutôt élevé, entre 3,6 et 4,4 (la meilleure note étant 5). En fonction des différentes catégories de substituts, les teneurs moyennes en protéines variaient entre 8,9 et 14,5 g/100g, celles en acides gras saturés entre 1,4 et 2,4 g/100g, celles en fibres entre 3,6 et 5,9 g/100g et celles en sodium entre 372 et 568 mg/100g. Il y avait cependant de grandes variabilités entre les produits. Par exemple, sur l'ensemble des produits étudiés, la quantité de protéines variait entre 0,3 et 36,1 g/100g et la quantité de sodium entre 58 et 1200 mg/100g. Pour trois catégories de substituts, les compositions nutritionnelles ont été comparées à celles des produits qu'ils cherchent à imiter (steak haché, saucisse, émincés). Comparé aux produits animaux, les substituts contenaient moins de protéines, de lipides et d'acides gras saturés et plus de fibres. Les steaks de viande et leur équivalent végétal avaient des teneurs similaires en sodium et les « saucisses » végétales contenaient moins de sodium que les saucisses d'origine animale (497 mg/100g vs. 826 mg/100g). A l'inverse, les émincés végétaux contenaient plus de sodium que les émincés de viande (401 mg/100g vs 64 mg/100g).

En France, l'association de défense des consommateurs CLCV (Consommation Logement Cadre de Vie) a étudié 96 produits à base de végétaux : galettes végétales, imitation viande (steak, saucisses, …) et produits panés (nuggets, cordon-bleus, …) (CLCV, 2020). Les galettes végétales et les imitations viandes avaient les produits avec les meilleurs Nutri-score (respectivement 97% et 87% de produits avec des Nutri-score A ou B) alors que les produits panés avaient de moins bons Nutri-score (63% de Nutri-score A ou B et 33% de Nutri-score C). Les imitations viande était cependant la catégorie où il y avait le plus de Nutri-score D (8% des produits) (**Figure 18**) (CLCV, 2020). Ainsi, en considérant la notation du Nutri-score, les substituts de viande semblent globalement de bonne qualité nutritionnelle mais il y a

d'importantes différences entre catégories et au sein des catégories, de sorte que l'on ne peut considérer comme homogène le groupe des substituts de viande.

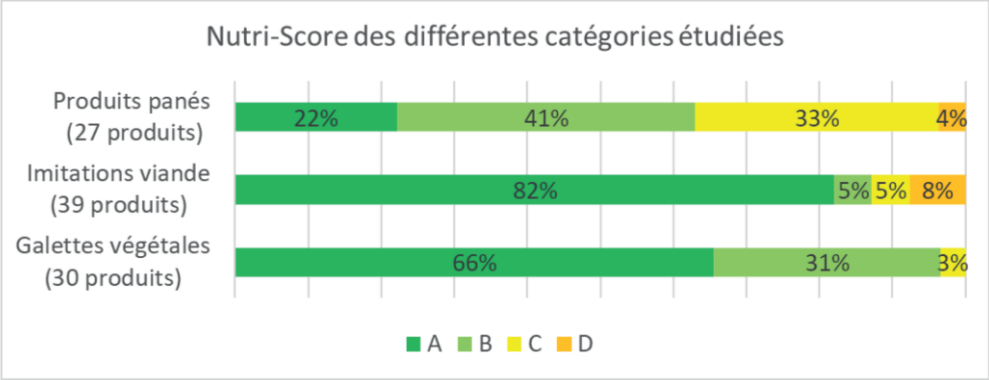


Figure 18: Nutri-Score de différentes catégories de substituts végétaux de viande (extrait de CLCV, 2020)

Fresán et al. ont étudié la composition nutritionnelle de 56 substituts de viande qu'ils ont classé en fonction de la source principale de protéines : substituts à base de soja, de blé, d'un mélange blé/soja ou à base de fruits à coque/légumes secs (Fresán et al., 2019). Il n'y avait pas de différence en fonction de la catégorie de substitut concernant la quantité de protéines (entre 18 et 25g/100g en fonction des catégories), d'acides gras polyinsaturés, de sodium, de vitamine A et de vitamine B12. En revanche, les substituts à base de soja avaient des teneurs plus élevées en énergie, fibres, oméga 3, fer, zinc, vitamines B1, B2, B6 et B9 et les substituts à base de fruits à coque/légumes secs avaient des teneurs plus élevées en lipides, acides gras monoinsaturés et vitamine B3 (**Figure 19**).

	Main Source of Protein				
	Wheat	Soy	Wheat/Soy	Nuts	*p* Value *
Number of products (n)	32	7	10	7	
Kcal	176.52 ± 36.79	234.62 ± 67.21	185.52 ± 30.53	204.60 ± 43.63	0.01
Protein (g)	21.68 ± 2.96	24.96 ± 17.19	21.44 ± 2.90	18.12 ± 5.03	0.30
Total fat (g)	5.68 ± 4.00	6.63 ± 4.14	5.64 ± 3.06	11.59 ± 8.33	0.03
Saturated fatty acids (g)	0.77 ± 0.54	0.94 ± 0.62	0.75 ± 0.39	1.70 ± 1.30	0.01
Monounsaturated fatty acids (g)	1.44 ± 1.08	1.64 ± 1.08	1.47 ± 0.85	5.13 ± 4.51	0.00
Polyunsaturated fatty acids (g)	3.05 ± 2.20	3.63 ± 2.34	3.01 ± 1.68	4.11 ± 2.46	0.64
Omega 3 (g)	0.11 ± 0.12	0.24 ± 0.27	0.08 ± 0.04	0.04 ± 0.05	0.04
Carbohydrates (g)	10.95 ± 3.18	20.31 ± 8.22	13.94 ± 2.90	9.63 ± 3.70	0.00
Fiber (g)	1.35 ± 0.65	6.35 ± 5.70	2.71 ± 0.58	3.01 ± 0.89	0.01
Cholesterol (mg)	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	0.00 ± 0.00	–
Iron (mg)	2.38 ± 0.69	6.05 ± 3.03	3.06 ± 0.99	3.62 ± 1.70	0.00
Zinc (mg)	0.88 ± 0.89	4.29 ± 2.02	1.24 ± 0.61	3.18 ± 1.83	0.00
Sodium (mg)	251.20 ± 163.50	267.06 ± 186.00	189.65 ± 162.30	162.18 ± 157.51	0.46
Vitamin A (µg)	9.91 ± 9.26	7.30 ± 6.80	13.87 ± 13.43	17.08 ± 20.54	0.34
Vitamin B1(µg)	0.05 ± 0.03	0.26 ± 0.23	0.09 ± 0.02	0.13 ± 0.09	0.00
Riboflavin (µg)	0.04 ± 0.05	0.15 ± 0.11	0.07 ± 0.03	0.05 ± 0.01	0.00
Niacin (µg)	0.32 ± 0.21	0.87 ± 0.71	0.35 ± 0.07	2.47 ± 2.43	0.00
Vitamin B6 (µg)	0.06 ± 0.03	0.24 ± 0.20	0.12 ± 0.02	0.13 ± 0.04	0.00
Vitamin B12 (µg)	1.10 ± 1.16	0.87 ± 1.08	2.24 ± 1.51	1.02 ± 0.72	0.17
Folic acid (µg)	20.37 ± 14.02	121.33 ± 123.37	40.33 ± 7.00	56.54 ± 26.62	0.00

* Differences between means assessed through ANOVA, followed by Tukey adjustment $p < 0.05$ was considered statistically significant.

Figure 19 : Composition nutritionnelle (/100g) de substituts de viande catégorisés en fonction de la principale source de protéines (moyenne ± SD) (extrait de Fresán et al., 2019)

Nous avons vu que la composition nutritionnelle des substituts à la viande différait de celle de la viande et variait en fonction des ingrédients composant le substitut. En effet, on peut supposer que le choix des ingrédients inclus dans les substituts à la viande actuellement présents sur le marché résulte principalement de la volonté d'imiter les propriétés

organoleptiques à la viande mais pas nécessairement d'imiter la composition nutritionnelle de la viande, à l'exception de la teneur en protéines (Bohrer, 2019). Ainsi, une étude d'optimisation linéaire a été menée pour identifier quels seraient les ingrédients à choisir afin de composer un substitut de viande qui minimiserait l'impact environnemental du substitut tout en conservant une composition nutritionnelle équivalente à celle de la viande (Van Mierlo et al., 2017). Les substituts modélisés devaient avoir une quantité de protéines, acides aminés indispensables, fer, zinc et vitamine B12 supérieure ou égale à une viande de référence (bœuf ou poulet), contenir entre 55 et 65g/100g d'eau et avoir une somme des ingrédients égale à 100g. Les substituts modélisés contenant uniquement des ingrédients végétaux étaient essentiellement composés d'eau comme ingrédient (entre 52 et 53g/100g) et de concentré de protéines de soja (entre 32 et 42g/100g) ainsi que d'autres ingrédients en plus faibles proportions (farine de soja, isolat de protéines de lupin ou de soja). Les substituts ayant une composition nutritionnelle équivalente à la volaille étaient enrichis en vitamine B12 et ceux ayant une composition nutritionnelle équivalente au bœuf étaient enrichis en vitamine B12, fer et zinc. Dans un modèle sans enrichissement, un substitut au poulet était modélisable en ajoutant des œufs, mais il n'était pas possible de modéliser un substitut avec une composition nutritionnelle équivalente au bœuf sans enrichissement. Cependant la composition de ces substituts ne prenait pas en compte la texture du produit ni son goût mais d'après ces résultats il semblerait que le soja soit l'ingrédient le plus approprié pour remplacer la viande. En effet, le soja est riche en protéines, avec une digestibilité et composition en acides aminés indispensables proches de certaines protéines animales, et est également une source d'acides gras polyinsaturés, de vitamines du groupe B, de fibres, de fer, de calcium et de zinc (Malav et al., 2015; Rizzo & Baroni, 2018).

Qualité nutritionnelle des boissons et desserts végétaux

La composition nutritionnelle dépend grandement de l'ingrédient principal de la boisson végétale (Mäkinen et al., 2016). Les boissons végétales ont généralement une faible teneur en protéines (<1g), à l'exception des boissons au soja qui ont des teneurs similaires au lait de vache (entre 3-4g de protéines pour 100g) et contiennent généralement moins d'acides gras saturés que le lait de vache mais peuvent contenir plus de sucres (et des sucres différents du lactose contenu dans le lait) (Mäkinen et al., 2016). Le lait est également une source de nutriments tels que le calcium, l'iode, les vitamines B2 et B12 et les boissons végétales contiennent de faibles quantités en ces nutriments, sauf lorsqu'elles sont enrichies (Mäkinen et al., 2016).

La composition nutritionnelle de boissons végétales nature à l'amande (7 références), au soja (7 références), au riz (5 références) et à la noix de coco (4 références) a été comparé à celle du lait de vache pour une portion de 240 mL (Vanga & Raghavan, 2018). Les boissons végétales sont moins énergétiques que le lait de vache (158 kcal) : en moyenne 36 kcal pour la boisson à l'amande, 95 kcal pour la boisson au soja, 133 kcal pour la boisson au riz et 49 kcal pour la boisson à la noix de coco. La quantité de protéines est également plus faible que celle du lait (8,11g/240mL) : en moyenne 1,67 g pour la boisson à l'amande, 0,85 g pour la boisson au riz et 0 g pour la boisson à la noix de coco, à l'exception de la boisson au soja qui contient des quantités similaires (8,71 g en moyenne). Les boissons végétales contiennent en général moins de glucides que le lait de vache (11,5g) à l'exception de la boisson au riz qui contient en moyenne 25 g de glucides, dont 13 g de sucre. Finalement, les boissons végétales contiennent aussi moins de lipides, et avec des profils différents, que le lait de vache qui contient, pour une portion de 240mL, 9,05g de lipides dont 5,64g d'acides gras saturés, 2,62g

d'acides gras monoinsaturés et 0,35g d'acides gras polyinsaturés. La boisson végétale à l'amande contient en moyenne 2,71g de lipides et majoritairement des acides gras monoinsaturés (1,67g contre 0,67g d'acides gras polyinsaturés et aucun acide gras saturés). La boisson au soja contient en moyenne 4,35g de lipides, majoritairement sous la forme d'acides gras polyinsaturés (2,4g contre 0,64g d'acides gras saturés et 0,84g d'acides gras monoinsaturés). La boisson au riz contient en moyenne 2,33g de lipides (0,16g d'acides gras saturés, 1,16g d'acides gras monoinsaturés, 0,83g d'acides gras polyinsaturés). La boisson à la noix de coco contient 4,38g de lipides en moyenne, essentiellement sous la forme d'acides gras saturés (4,13g en moyenne). Un autre aspect important lorsque l'on étudie la composition nutritionnelle des boissons végétales est la teneur en calcium. Dans cette étude, les teneurs en calcium relevées variaient entre 0 et 495mg en fonction des marques (vs. 294mg pour le lait de vache) en fonction de si la boisson est enrichie ou non. Il ressort de cette étude que la boisson au soja semble la plus adaptée au niveau de la teneur en protéines et que les boissons au soja et à l'amande présentent un profil intéressant en lipides. A l'inverse, la boisson au riz est très sucrée par rapport au lait et aux autres boissons et la boisson à la noix de coco apporte essentiellement des acides gras saturés, toutefois à des teneurs inférieures à celle du lait de vache. Les boissons végétales peuvent également apporter des vitamines et minéraux peu présents dans le lait de vache comme la vitamine E mais contiennent également moins de vitamines du groupe B (Vanga & Raghavan, 2018).

Une autre étude a comparé la composition nutritionnelle du lait de vache (avec différents niveaux d'écrémage) avec 17 boissons végétales (soja, noix de coco, riz, chanvre, amande, noix de cajou) (Chalupa-Krebzdak et al., 2018). Alors que la teneur en protéines du lait de vache se situe entre 3,15 et 3,37g/100mL, celle des boissons végétales varie entre 0,31 et 3,16g/100mL avec les teneurs les plus élevés pour les boissons au soja (2,88g/100mL en moyenne). La teneur en lipides du lait de vache varie fortement en fonction de si le lait est écrémé (0,08g de lipides) ou entier (3,27g). De même, la quantité de lipides dans les boissons végétales varie de 0,97g (boisson au riz) à 6,00g (boisson à la noix de coco). Contrairement au lait de vache, les boissons végétales, à l'exception de celles à base de noix de coco, contenaient moins d'acides gras saturés et plus d'acides gras mono et polyinsaturés. Une forte variation d'apport calorique et de teneur en glucides était observée pour les boissons végétales : entre 12kcal (boisson à l'amande) et 92kcal (boisson à la noix de coco) et entre 0,42g de glucides (boisson à l'amande) et 9,41g de glucides (boisson à la noix de coco). La variabilité de la composition nutritionnelle des boissons végétales s'observe en fonction de la nature de la boisson (si elle est à base de soja ou d'amande par exemple) mais également entre deux boissons similaires (par exemple, sur les deux boissons à la noix de cajou étudiées, une apporte 25kcal et l'autre 79kcal). Cela peut notamment s'expliquer par le degré de dilution de la boisson (c-à-d. si plus ou moins d'eau a été ajouté au moment de la production – résultant en une boisson plus ou moins dense) mais également si la boisson est sucrée ou non (dans cette étude, les boissons natures et sucrées ont été étudiées indifféremment). Concernant la quantité de calcium, on observe également une grande variabilité en fonction de si la boisson est enrichie ou non (entre 0 et 197mg pour les boissons végétales, contre ≈120mg dans le lait de vache). Cependant, bien que certaines boissons contiennent plus de calcium que le lait de vache, la teneur indiquée ne correspond pas toujours à la quantité effectivement consommée car le calcium ajouté a tendance à se sédimenter au fond de la bouteille, ce qui entraîne des pertes (Chalupa-Krebzdak et al., 2018).

Un autre point à aborder concernant la comparaison des valeurs nutritionnelle des produits laitiers et de leurs alternatives végétales est la teneur en iode. En effet, les produits laitiers

sont une des principales sources d'iode du fait des pratiques agricoles (Bath et al., 2017; D. I. W. Phillips, 1997). Nous avons vu dans la partie précédente que les apports en iode étaient souvent sous-optimaux, en particulier dans les populations végétaliennes (Eveleigh et al., 2020). La concentration en iode de 47 boissons végétales (soja, amande, noix de coco, avoine, riz, noisette, chanvre) et de 10 marques de lait de vache demi-écrémé (5 laits conventionnels et 5 laits biologiques) a été mesurée au Royaume-Uni (Bath et al., 2017). Trois boissons végétales étaient enrichies en iode et atteignaient des concentrations de 266, 280 et 287 µg/kg. Les autres n'étaient pas enrichies et leur concentration médiane en iode était de 7,3 µg/kg, ce qui est très inférieur à la valeur médiane du lait conventionnel (438 µg/kg) et du lait biologique (324 µg/kg) (Bath et al., 2017). De même, une autre étude aux Etats-Unis a mesuré la concentration en iode de 30 références de boissons végétales et a montré que la teneur moyenne était 3,1 ± 2,5 µg/250mL, soit 12,3 ± 10,1 µg/L. En comparaison, la concentration en iode a été mesurée pour deux marques de lait et était de 96,8 µg/250mL et 101,1 µg/250mL (Ma et al., 2016). En supposant que 1L de lait ≈ 1kg de lait, les ordres de grandeur des concentrations en iode de ces deux études sont similaires et confirment que les boissons végétales contiennent des teneurs en iode bien inférieures à celles du lait de vache.

Impacts sur la qualité de l'alimentation de l'intégration de substituts végétaux dans l'alimentation

Les substituts végétaux de viande et de lait ont ainsi des profils nutritionnels différents de ceux des produits animaux, et qui varient également en fonction des ingrédients utilisés. La viande et les produits laitiers sont pourtant des contributeurs importants aux apports nutritionnels, comme nous avons pu le voir dans la seconde partie. Dans l'étude INCA3, la contribution des différents groupes alimentaires aux apports nutritionnels a été calculée (Anses, 2017) (**Tableau 4**). Chez les adultes, la viande (viande rouge, volaille, charcuterie, abats) et les produits laitiers sont des contributeurs importants en protéines, rétinol, vitamines B2, B5, B12, K2, phosphore et zinc. La viande est également un contributeur important de vitamines B3 et B6 et de fer et les produits laitiers de vitamine D, calcium et iode. Cependant, la viande et les produits laitiers (principalement le fromage et la charcuterie) sont également des contributeurs d'acides gras saturés et de sodium (Anses, 2017). Ainsi substituer ces produits par des produits végétaux aura très certainement un impact sur les apports nutritionnels et la qualité de l'alimentation.

Tableau 4: Apports et contribution aux apports en nutriments des produits laitiers et de la viande pour les adultes de 18-79 ans de l'étude INCA3 (adapté de Anses, 2017)

Nutriments	Apports totaux	Pourcentage de contribution aux apports (%)							
		Laits	Yaourts et fromages blancs	Fromages	Entremets et crèmes desserts	Viandes (hors volaille)	Volailles	Charcuterie	Abats
Protéines	83,1 g/j	2,9	4,0	**8,0**	0,7	**14,8**	**8,2**	**6,1**	0,7
Sucres	95,1 g/j	3,6	**6,7**	0,1	3,0	0,0	0,0	0,3	0,0
Lipides	76,3 g/j	1,4	3,2	**10,8**	1,4	**5,8**	2,5	**6,7**	0,4
AGS	32,4 g/j	2,0	**5,0**	**16,6**	2,0	**5,8**	1,8	**6,4**	0,4
AGMI	25,9 g/j	0,9	2,1	**7,9**	0,9	**6,4**	3,0	**8,4**	0,5
AGPI	9,8 g/j	0,3	0,7	3,0	0,4	4,4	4,1	**5,8**	0,3
Rétinol	470,7 µg/j	2,6	3,6	**14,2**	1,7	0,7	0,7	**19,4**	**18,1**
Vitamine B1	1,2 mg/j	3,6	4,2	0,9	0,5	**9,3**	2,8	**8,6**	0,4
Vitamine B2	1,8 mg/j	**7,2**	**9,9**	**7,5**	1,5	**5,3**	2,9	4,6	1,7
Vitamine B3	20,5 mg/j	0,3	0,6	1,0	0,1	**13,0**	**11,1**	**6,7**	1,0
Vitamine B5	5,7 mg/j	**5,5**	**6,5**	2,6	1,2	**5,7**	**5,8**	3,6	1,2
Vitamine B6	1,7 mg/j	1,6	2,3	2,3	0,4	**10,6**	**7,1**	4,2	0,7
Vitamine B9	304,9 µg/j	2,0	**5,1**	4,4	0,8	1,2	0,7	1,4	1,5
Vitamine B12	5,4 µg/j	**5,2**	3,8	**7,2**	0,5	**15,8**	3,4	**5,7**	**8,1**
Vitamine D	3,1 µg/j	**5,3**	**15,7**	4,4	1,3	4,0	2,2	4,2	1,6
Vitamine K2	13,1 µg/j	4,8	3,3	**21,4**	0,0	**11,6**	**38,6**	2,6	1,6
Sodium	3180,7 mg/j	1,0	1,2	**5,6**	0,3	1,1	1,5	**7,8**	0,3
Calcium	929,0 mg/j	**9,0**	**10,2**	**18,3**	2,0	0,6	0,3	0,5	0,0
Phosphore	1239,8 mg/j	**5,3**	**5,8**	**10,5**	1,3	**7,7**	**5,0**	4,1	0,6
Potassium	3108,2 mg/j	3,8	3,9	1,2	1,1	**5,2**	2,7	3,1	0,2
Fer	10,5 mg/j	0,3	1,4	0,8	2,0	**9,2**	3,3	**5,7**	1,3
Cuivre	1,7 mg/j	0,4	1,0	2,2	1,0	2,4	1,5	3,1	**5,3**
Zinc	9,5 mg/j	2,9	3,3	**9,1**	0,9	**21,2**	4,5	**6,4**	1,0
Iode	148,0 µg/j	**6,7**	**7,6**	**5,5**	1,1	1,6	0,7	1,8	0,2

A partir d'une enquête nationale aux Pays-Bas (Dutch National Food Consumption Survey 2007-2010, n=2102 adultes, 19-69 ans), Seves et al. ont modélisé des régimes alimentaires où la viande et les produits laitiers du régime observé étaient remplacés par la même quantité de substituts végétaux (Seves et al., 2017). La viande consommée au diner était remplacée par un mélange de substituts de viande, légumes secs et tofu et le lait et les yaourts étaient remplacés par des boissons et desserts au soja. La viande et le fromage consommés en sandwich ou en en-cas étaient remplacés par diverses alternatives végétales (ex : produits tartinables végétariens, « jambon » végétal). Il y avait deux scénarios modélisés : un où 30% de la viande et des produits laitiers étaient remplacés et un où 100% de la viande et des produits laitiers étaient remplacés. Substituer 30% de la viande et des produits laitiers a eu en général peu d'impacts sur les apports nutritionnels et sur les prévalences d'inadéquation d'apport. En revanche, substituer 100% de la viande et des produits laitiers a entraîné de moindres apports et une augmentation de la prévalence d'inadéquation pour le zinc, les vitamines A, B1 et B12. Les apports en protéines ont également diminué par rapport au régime observé (de 96g/j à 77g/j pour les hommes et de 74g/j à 60g/j pour les femmes) mais cela a eu un faible impact sur la prévalence d'inadéquation, qui était de 0% dans le régime observé et est passée à 1% pour les hommes et 3% pour les femmes dans le scénario de 100% de remplacement. Dans les scénarios modélisés, les apports en calcium diminuaient également (ex. pour les hommes 1128mg/j dans le régime observé, 1044mg/j dans le scénario 30% et 839mg/j dans le scénario 100%). Substituer la viande et les produits laitiers entraînait également des apports plus élevés en fibres et vitamine D et des apports légèrement plus faibles en sodium. Pour le fer, les apports sont également plus élevés ce qui diminue la

prévalence d'inadéquation (pour les femmes de 19-30ans, la prévalence d'inadéquation passe de 57% dans le régime observé à 26% dans le scénario 100%), mais cela ne prend pas en compte la biodisponibilité du fer. Finalement, alors que 97% des hommes et 91% des femmes avaient des apports en acides gras saturés excessifs (supérieurs à 10% de l'apport énergétique), substituer toute la viande et les produits laitiers diminuerait ce pourcentage à 19% pour les hommes et 17% pour les femmes.

Une étude avec la même méthode avait été précédemment menée sur un échantillon de 398 femmes de 18 à 30 ans (Dutch Food Consumption Survey, 2003) (Temme et al., 2013). D'un point de vue nutritionnel, seuls les apports en acides gras saturés et fer étaient évalués. Ainsi, les apports en fer ont augmenté avec la substitution de la viande et des produits laitiers (9,5 mg/j pour le régime observé, 10,2 mg/j dans le scénario 30% de substitution et 12,0mg/j dans le scénario 100%) alors que les apports en acides gras saturés ont diminué (13,2% de l'apport énergétique dans le régime observé puis 12,1% pour le scénario 30% et 9,2% pour le scénario 100%). En revanche, alors que dans le régime observé, 10% du fer consommé était sous forme héminique, dans le scénario 100% de substitution, le fer consommé était uniquement sous forme non-héminique. Ainsi, substituer la viande et les produits laitiers par des substituts végétaux permettrait d'augmenter les apports en fer des femmes non-ménopausées, mais sous une forme moins absorbable. Cependant, une évaluation des quantités de fer biodisponible n'a pas été réalisée dans cette étude.

Mertens et al. ont eu une approche différente et ont mené une étude d'optimisation des régimes pour évaluer quelle pourrait être la place des substituts de viande dans des régimes durables (Mertens et al., 2020). A partir des données de consommation de quatre pays Européens (Danemark, n=1385 ; République Tchèque, n=1386 ; Italie, n=1978 ; France, n=1713), la consommation de viande a été remplacée par des substituts végétaux et les régimes ainsi obtenus ont été optimisés selon trois procédures avec des objectifs différents : minimiser les écarts aux régimes observés, maximiser la qualité de l'alimentation ou minimiser les émissions de GES. Par rapport aux régimes observés, les régimes modélisés contenant des substituts végétaux était de meilleure qualité avec des émissions de GES moins importantes et une consommation réduite de viande. Lorsque les substituts végétaux étaient théoriquement enrichis en fer, vitamines B1, B2, B3, B12, la diminution de la consommation de viande dans les régimes modélisés était encore plus importante. Ainsi, les substituts végétaux pourraient permettre d'aller vers des régimes plus végétalisés tout en maintenant la qualité de l'alimentation. Cependant, il faut noter que dans ces régimes optimisés, la consommation d'autres groupes alimentaires, autre que la viande et les substituts végétaux, était modifiée et que l'amélioration de la qualité nutritionnelle observée n'était pas seulement attribuable aux substituts végétaux (Mertens et al., 2020).

En effet, l'impact des substituts végétaux sur la qualité de l'alimentation dépend du régime alimentaire dans lequel ils s'insèrent et se contenter de remplacer les produits animaux par des substituts végétaux ne sera peut-être pas suffisant pour améliorer la qualité de l'alimentation et d'autres modifications du régime seraient nécessaires (Hu et al., 2019). Nous avons vu que les profils nutritionnels des produits animaux et de leurs substituts étaient différents et que substituer tout ou partie de la viande et des produits laitiers modifierait le profil d'apports en nutriments, avec des conséquences qui pourraient à la fois être favorables (avec moins d'acides gras saturés) ou défavorables (avec des apports en fer moins biodisponible). De plus, nous avons vu dans la deuxième partie que bien que la consommation de produits végétaux était généralement associée à des bénéfices pour la santé, cela dépendait

notamment des aliments végétaux consommés. Cependant, les substituts végétaux sont généralement ultra-transformés et leurs impacts sur la santé et la qualité de l'alimentation sont peu connus, d'autant plus que ces produits sont récents et les ingrédients et technologies employées évoluent rapidement (Wickramasinghe et al., 2021). D'un autre côté, les substituts végétaux auraient un moindre impact environnemental que les produits animaux (Mäkinen et al., 2016; Nijdam, 2012; Smetana et al., 2015) et pourraient donc être un levier intéressant pour favoriser l'adoption d'une alimentation plus durable. Ainsi, approfondir les recherches sur la qualité nutritionnelle des substituts végétaux permettrait de mieux appréhender le rôle qu'ils pourraient jouer dans la végétalisation de l'alimentation (Wickramasinghe et al., 2021).

Messages clés de la troisième partie de l'introduction

- Les substituts végétaux sont des produits visant à reproduire l'usage et les propriétés organoleptiques des produits animaux. Les substituts les plus consommés sont les substituts à la viande, les boissons végétales et les desserts végétaux.
- Il existe une grande variété de substituts du fait de la diversité des ingrédients et procédés de fabrication utilisés.
- Les substituts végétaux semblent être consommés quel que soit le régime alimentaire, mais avec une consommation d'autant plus importante que les individus réduisent ou excluent la consommation de produits animaux.
- Les substituts végétaux sont faciles à intégrer dans les habitudes alimentaires car ils ne nécessitent pas de modifier la structure des repas. Leur praticité pourrait ainsi faciliter leur consommation dans une optique de réduction de la consommation de produits animaux. Cependant la réticence à découvrir de nouveaux produits, leur prix et la crainte qu'ils soient de moins bonne qualité nutritionnelle que la viande pourraient également être des freins à leur consommation.
- En comparaison à la viande, les substituts de viande ont généralement des teneurs inférieures en protéines, lipides, acides gras saturés (bien que certains substituts arrivent à des niveaux équivalent) et contiennent plus de fibres. Le profil en micronutriment est également différent de celui de la viande.
- En comparaison au lait, les boissons végétales contiennent en général moins de protéines et d'acides gras saturés et plus de sucres d'acides gras mono et polyinsaturés. Les boissons végétales contiennent également peu ou pas de calcium et d'iode, sauf si elles sont enrichies.
- Cependant, la composition nutritionnelle des substituts végétaux de viande et de lait dépend des ingrédients végétaux qui les composent.
- La viande et les produits laitiers étant des contributeurs importants aux apports nutritionnels, remplacer ces produits par des substituts végétaux aurait certainement des impacts sur les profils d'apports nutritionnels qu'il est important de quantifier.

CHAPITRE II

–

TRAVAUX DE THÈSE

CHAPITRE II : TRAVAUX DE THÈSE

1. Justification des travaux

Nous avons abordé dans l'introduction la nécessité de s'orienter vers une alimentation plus durable et les différents enjeux de santé qui y étaient associés. Il est possible de réduire l'impact environnemental de notre alimentation en réduisant la consommation de produits animaux et en favorisant la consommation de produits végétaux tels que les légumes, fruits, céréales complètes, légumineuses, fruits à coque et graines. Plusieurs études ont montré que les individus ayant une alimentation plus végétale, ou adoptant un régime restrictif (pesco-végétarien, lacto-ovo-végétarien, végétalien) auraient un moindre risque de maladies cardiovasculaires, diabètes ou cancer et une moindre mortalité associée aux maladies non transmissibles. De plus, à l'échelle des nutriments, réduire sa consommation de produits animaux au profit de produits végétaux permettrait de réduire les apports en nutriments consommés en excès (comme les acides gras saturés) et d'augmenter les apports en nutriments insuffisamment consommés (comme les fibres). En revanche, ces régimes pourraient également entraîner des apports plus faibles en certains nutriments (essentiellement fer, vitamine B12, zinc, iode et calcium) avec un risque plus élevé de carence dans certaines situations. Bien que les études de modélisation montrent qu'il est possible de concevoir des régimes alimentaires minimisant les impacts environnementaux tout en assurant la satisfaction des besoins nutritionnels, l'observation des régimes végétariens montrent des prévalences d'inadéquation d'apports plus élevées pour certains nutriments pour les individus suivant ces régimes par rapport aux non-végétariens. De plus, la consommation d'aliments végétaux n'aurait pas le même impact sur la santé en fonction de si l'on favorise des aliments végétaux sains (légumes, fruits, céréales complètes, etc.) ou des aliments végétaux moins sains (jus de fruits, céréales raffinées, produits sucrés, etc.). Ainsi, l'adéquation nutritionnelle et les bénéfices santés des régimes végétalisés dépendrait à la fois du degré de végétalisation et de la nature des aliments végétaux consommés.

Il existe également plusieurs freins à la végétalisation de l'alimentation, tels que l'attachement gustatif et culturel à la viande, le faible attrait sensoriel pour les aliments végétaux et le manque de connaissances et compétences pour cuisiner des plats sans produits animaux. Dans ce contexte, les substituts végétaux, produits imitant l'usage des produits animaux tel que la viande ou les produits laitiers, pourraient faciliter la végétalisation de l'alimentation en remplaçant facilement les produits animaux sans nécessiter de trop modifier ses habitudes alimentaires et le reste de l'alimentation. Cependant, les substituts végétaux modernes ayant connu un récent développement, nous avons peu de recul sur ces produits quant à leurs impacts sur les apports nutritionnels et la santé. De plus, il est difficile d'évaluer comment un individu souhaitant végétaliser son alimentation adapterait son alimentation. Cependant, la manière de passer d'un régime basé sur les protéines animales à un régime basé sur les protéines végétales aura très certainement un impact sur la qualité du régime alimentaire mais des scénarios de végétalisation de l'alimentation ont été peu étudiés.

L'objectif de cette thèse était d'étudier le rôle des aliments issus de la filière oléo-protéagineuse, et plus particulièrement des substituts végétaux, pour favoriser des régimes alimentaires sains dans le cadre d'une végétalisation de l'alimentation. En effet, la filière oléo-protéagineuse, qui produit des plantes dont les graines ou fruits sont riches en matières

grasses (ex. colza, soja, lin, olive) et des plantes dont les graines sont riches en protéines (ex. légumes secs comme les pois, lentilles, haricots), peut fournir des aliments utiles à une transition alimentaire à la faveur des protéines végétales. Les aliments produits par cette filière peuvent être utilisés sous leur forme entières (légumes secs, graines) ou sous forme transformés (huiles, farines, protéines de soja) et peuvent être incorporés en tant qu'ingrédients dans des aliments. Nous avons notamment vu dans l'introduction que les substituts végétaux sont souvent composés d'ingrédients issus de cette filière, mais aussi d'ingrédients issus des filières de production de céréales et de légumes. Les dernières recommandations du PNNS (Programme national nutrition santé) encourageant la consommation de légumes secs, fruits à coque et huiles végétales (colza, noix, olive) (Santé Publique France, 2019), il est intéressant d'étudier la place de ces aliments dans le cadre d'une végétalisation de l'alimentation.

D'un point de vue méthodologique, différentes méthodes ont été utilisées pour modéliser ou simuler ces changements et différents outils ont été développés ou adaptés afin de mieux caractériser l'alimentation. Dans un premier volet, un état des lieux de la consommation de protéines animales et végétales, en lien avec différents indicateurs de l'alimentation (qualité, diversité, degré de transformation) a été effectué. Le second volet de cette thèse consistait en la modélisation de régimes alimentaires où les produits riches en protéines animales sont substitués par différents produits végétaux, dont des substituts végétaux. Finalement, le troisième volet de cette thèse a consisté en un travail d'optimisation afin d'évaluer le potentiel des substituts à la viande dans l'amélioration de la qualité de l'alimentation. Pour l'ensemble des travaux présentés dans cette thèse, nous nous sommes basés sur les consommations alimentaires des adultes ayant participé à l'étude INCA3 (n=2121), menée en France métropolitaine en 2014-2015. Les consommations alimentaires ont été recueillis par trois rappels de 24h non consécutifs, répartis sur trois semaines (Anses, 2017).

1.1. Développement d'outils et caractérisation de l'alimentation en France, en lien avec la consommation de protéines

Dans un premier temps, nous avons mené des études d'observations pour mieux caractériser la consommation de protéines chez les adultes français, et plus particulièrement de protéines végétales. Nous avons adapté ou développé des outils afin de caractériser l'alimentation selon différents critères (adéquation nutritionnelle, diversité de l'alimentation, degré de transformation, risque de carence).

- **Application et adaptation d'un score de qualité de l'alimentation, basé sur l'adéquation nutritionnelle**

Le principal indicateur de qualité de l'alimentation que nous avons utilisé est le score PANDiet (Probability of Adequate Nutrient Intake). Le score PANDiet, développé par Verger et al., évalue la qualité de l'alimentation en estimant les probabilités d'adéquation en nutriments par rapport aux références nutritionnelles (Verger et al., 2012). Il est composé de deux sous scores, le score d'adéquation (AS) et le score de modération (MS). Le sous-score d'adéquation est la moyenne, multipliée par 100, des probabilités d'avoir des apports suffisants pour 26

nutriments pour lesquels il existe un besoin défini ou un apport satisfaisant. Le sous-score de modération est la moyenne, multipliée par 100, des probabilités de ne pas avoir d'apports excessifs pour 6 nutriments dont les apports ne devraient pas dépasser une certaine valeur de référence. Le PANDiet est la moyenne de ces deux sous-scores. Pour chaque nutriment, les probabilités d'adéquation pour un individu sont mesurées en prenant en compte l'apport moyen de l'individu pour ce nutriment, la référence nutritionnelle (le plus souvent le besoin nutritionnel moyen, BNM), la variabilité intra-individuelle entre les jours de rappels, la variabilité interindividuelle du besoin et le nombre de jour de rappels selon la formule suivante :

$$F\left(\frac{y-r}{\sqrt{{SD_r}^2+\frac{{SD_y}^2}{n}}}\right)$$

F : fonction *probnorm* de SAS, qui donne la probabilité qu'une observation d'une distribution normale standard soit inférieure ou égale à l'argument de la fonction
y : apport moyen de l'individu pour le nutriment donné
r : recommandation nutritionnelle utilisée pour ce nutriment
SDr : variabilité interindividuelle de la recommandation nutritionnelle de ce nutriment
SDy : variabilité intra-individuelle de l'apport de ce nutriment
n : nombre de jours dans le recueil de consommation individuel

De Gavelle et al. avaient actualisé le PANDiet en prenant en compte les références nutritionnelles de l'Anses de 2016 (Anses, 2016e) et en considérant la digestibilité ou l'absorption des protéines, du fer et du zinc (de Gavelle et al., 2018). Pour les protéines, il avait été considéré que les protéines végétales étaient 5% moins digestibles que les protéines animales. Pour le fer et le zinc, les probabilités d'adéquation sont calculées à partir du fer et zinc absorbé, en utilisant des formules estimant leur absorption (Armah et al., 2013; Hallberg & Hulthén, 2000; Miller et al., 2007). Pour le fer non-héminique, l'absorption est déterminée au moyen de l'équation suivante (Armah et al., 2013) :

$$Ln\ Absorption\ (\%) = 6{,}294 - 0{,}709\ln(SF) + 0{,}119\ln(C) = 0{,}006\ln(MFP+0{,}1) -$$

$$0{,}055\ln(T+0{,}1) - 0{,}247\ln(P) - 0{,}137\ln(Ca) - 0{,}083\ln(NH)$$

Où SF est la ferritine sérique (µg/L), C la vitamine C (mg), MFP la viande, le poisson et la volaille (g), T le thé (en nombre de tasses), P les phytates (mg), Ca le calcium (mg) et NH le fer non-héminique (mg).

Nous avons adapté le calcul du PANDiet aux adultes de plus de 65 ans en considérant un besoin plus important en protéines à partir de cet âge. En effet, la référence nutritionnelle pour la population (RNP) est fixée à 0,83 g/kg de poids corporel pour les adultes de moins de 65 ans et à 1,0 g/kg de poids corporel pour les hommes et les femmes de plus de 65 ans (Anses, 2019a). Cela est présenté dans l'**article n°2.** De plus, l'Anses a de nouveau actualisé les références nutritionnelles françaises (Anses, 2021) et nous avons donc actualisé le PANDiet avec ces nouvelles références. Cette mise à jour du PANDiet est présentée dans l'**article n°4**. Pour le score d'adéquation, les références nutritionnelles ont été modifiées pour la vitamine A, la vitamine B5, la vitamine E, le cuivre, le magnésium et le manganèse. Pour le sodium inclut dans le score de modération, l'Anses a défini une limite supérieure de sécurité (LSS), alors que la référence nutritionnelle précédente était un apport satisfaisant correspondant à l'apport médian de la population française. La référence pour le sodium a donc été actualisée dans le PANDiet. De plus, la formule pour l'estimation du zinc absorbé a été modifiée pour reprendre la même équation que celle utilisée par l'EFSA (European Food Safety Authority) (EFSA NDA Panel, 2014) :

$$TAZ = 0.5 \times \left(0.033 \times \left(1 + \frac{TDP}{0.68}\right) + 0.091 + TDZ - \sqrt{\left(0.033 \times \left(1 + \frac{TDP}{0.68}\right) + 0.091 + TDZ\right)^2 - 4 \times 0.091 \times TDZ} \right)$$

Où TAZ est la quantité de zinc absorbé (mmol), TDZ le zinc alimentaire (mmol) et TDP les phytates alimentaires (mmol).

- **Indices de diversité de l'alimentation et associations avec la qualité de l'alimentation et la consommation de protéines**

Les études évoquées dans l'introduction ont notamment mis en avant que les différents aliments sources de protéines n'avaient pas les mêmes impacts sur la santé (Song et al., 2016; Tian et al., 2017) et étaient différemment associés à l'adéquation nutritionnelle (Camilleri et al., 2013; de Gavelle et al., 2018). Bianchi et al. ont également montré que l'adéquation nutritionnelle était positivement associée à la diversité de l'alimentation, la consommation de protéines végétales et de protéines animales (Bianchi et al., 2016). La consommation de protéines végétales était également associée à la diversité (Bianchi et al., 2016). Les associations entre diversité et qualité de l'alimentation ou santé sont parfois contradictoires, notamment car il existe de nombreuses manières d'estimer la diversité de l'alimentation (Verger et al., 2021). La diversité peut s'exprimer à différents niveaux (aliments ou groupes d'aliments) et selon différents aspects (nombre différents d'aliments consommés, répartition énergétique entre les aliments) (Verger et al., 2021). Une alimentation plus diversifiée peut provenir d'une consommation diverse d'aliments à favoriser (fruits, légumes, …) ou au contraires d'aliments à limiter (snacks, boissons sucrées, …). Ainsi, nous avons voulu approfondir cette question de la relation entre qualité et diversité de l'alimentation, en intégrant la dimension protéique, et plus particulièrement la consommation de protéines végétales. En effet, dans les pays occidentaux, les céréales sont les principaux contributeurs aux apports protéiques végétaux (≈50-60% en France) alors que les légumineuses ont une contribution très minoritaire (≈2-3% en France) (Halkjær et al., 2009). Nous avons ainsi voulu étudier si la distribution des apports protéiques végétaux entre les différentes sources de protéines végétales était associée à la qualité de l'alimentation.

De Oliveira Otto et al. ont mené un travail sur la diversité en développant trois indices mesurant trois aspects différents de la diversité : le nombre d'aliments différents consommés, la distribution de l'apport énergétique entre les aliments consommés et la dissimilarité entre les aliments consommés (de Oliveira Otto et al., 2015). L'homogénéité de la distribution de l'apport énergétique entre les aliments consommés se mesure avec l'indice Berry qui prend en compte la contribution de chaque groupe d'aliments à l'apport énergétique total : $Indice\ Berry = 1 - \sum_{i=0}^{n} {s_i}^2$, où s_i représente la part du groupe d'aliments i à l'apport énergétique total et n le nombre total de groupes d'aliments. Plus l'apport énergétique est distribué équitablement entre les groupes (s_i similaires), plus l'indice est élevé. A l'inverse, plus un seul groupe d'aliment tend à contribuer fortement à l'apport énergétique (s_i proche de 1) plus l'indice Berry tend vers 0.

La dissimilarité représente la « distance » entre deux aliments en fonction des attributs qu'ils se partagent ou non selon l'équation : $Distance\ Jaccard = \frac{B_x + C_y}{A_{xy} + B_x + C_y}$, où A_{xy} représente le nombre d'attributs partagés entre les aliments x et y, B_x représente le nombre d'attributs uniques à l'aliment x et C_y le nombre d'attributs uniques à l'aliment y. Ainsi, plus les aliments

x et y ont des points communs, plus la distance Jaccard sera faible. A l'inverse, si les aliments n'ont aucun attribut commun (A_{xy}=0), la distance est égale à 1. Les attributs entre deux aliments peuvent être définis en se basant sur leur composition nutritionnelle par exemple.

Il nous a semblé pertinent d'adopter une démarche similaire à celle de De Oliveira Otto et al. en évaluant la diversité alimentaire à partir de ces trois mêmes indices, mais en les déclinant à différents niveaux : diversité totale, diversité à l'échelle des sources de protéines, diversité à l'échelle des sources de protéines végétales. L'application de ces scores de diversité et les associations entre diversité, qualité de l'alimentation (évaluée avec le PANDiet) et consommation de protéines végétales sont présentées dans l'**article n°1**.

- **Evaluation de la qualité de l'alimentation en fonction du degré de transformation de l'alimentation**

Un aspect de l'alimentation qui est de plus en plus étudié actuellement est le degré de transformation des aliments consommés. En effet, un aliment peut se retrouver sous différentes formes qui n'ont pas subi les mêmes étapes de préparation (par ex., un grain de riz et une galette de riz soufflé). Pourtant, certaines étapes de transformation peuvent modifier la qualité nutritionnelle des aliments (Reddy & Love, 1999). De plus, certains produits transformés peuvent contenir des quantités plus importantes de matières grasses, de sel ou de sucre pour améliorer la conservation et les propriétés gustatives du produit (Monteiro, Cannon, Levy, et al., 2019).

Pour évaluer le degré de transformation des aliments consommés dans une population, Monteiro et al. ont développé la classification NOVA (Monteiro et al., 2010). Cette classification comporte 4 catégories pour classer les aliments selon leur degré de transformation : aliments peu ou pas transformés (groupe 1), ingrédients culinaires (groupe 2), aliments transformés (groupe 3) et aliments ultra-transformés (groupe 4) (**Tableau 5**)(Monteiro et al., 2016). Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction, de nombreuses études ont évalué la consommation d'aliments ultra-transformés et ont montré qu'une consommation importante de ces aliments serait associée à un risque plus élevé d'obésité et de maladies non-transmissibles (Monteiro, Cannon, Lawrence, et al., 2019).

Tableau 5 : Description des groupes de la classification NOVA (d'après Monteiro et al., 2016)

Groupes de la classification NOVA	Description du groupe	Aliments inclus dans le groupe (liste non exhaustive)
Groupe 1 : Aliments peu ou pas transformés	Aliments directement issus de la production agricole ayant subi une transformation minimale pour les nettoyer, éliminer les parties non comestibles et améliorer leur conservation (séchage, broyage, congélation, torréfaction, pasteurisation, fermentation non alcoolique, …)	Fruits et légumes (frais, congelés, séchés, …), fruits à coque et graines (non sucrés/salés) Viande, produits de la mer, œuf, lait, yaourt nature Céréales, légumineuses, pâtes, farines Epices, herbes aromatiques, thé, café, infusion, eau Mélange d'aliments issus de ce groupe (ex. mélange de fruits secs)
Groupe 2 : Ingrédients culinaires	Ingrédients obtenus à partir d'aliments du groupe 1 après des procédés tels que le pressage, raffinage, broyage. Ingrédients utilisés pour assaisonner et cuisiner les aliments du groupe 1.	Sel Sucre, miel, sirop d'érable Huiles végétales, graisses animales Amidons Vinaigres

Groupe 3 : Aliments transformés	Aliments issus de l'assemblage d'aliments des groupes 1 et 2. Aliments ayant subi des procédés et cuissons pour allonger leur durée de vie (ex. fumage, salage, fermentations).	Légumes, légumineuses et poissons en conserve. Fruits au sirop. Fruits à coque et graines salées ou sucrées. Viandes salées, saumurées ou fumées. Fromages, pains frais, bière, cidre et vin.
Groupe 4 : Aliments ultra-transformés	Aliments qui peuvent être composés de nombreux ingrédients et additifs pour améliorer la palatabilité des produits. Aliments prêts à consommer, d'une grande praticité. Utilisation de procédés de transformation et d'ingrédients qui n'ont pas d'équivalent domestique.	Produits prêts à chauffer (pizzas et pâtes préemballées) ; Soupes et nouilles instantanées ; Nuggets, saucisses, charcuteries ; Margarines ; Snacks salés ou sucrés, bonbons, biscuits, gâteaux, céréales du petit déjeuner, barres énergétiques ; Glaces, chocolats. Boissons sucrées, énergisantes ; Boissons alcoolisées distillées (whisky, gin, vodka)

Il y a peu d'études ayant évalué la consommation d'aliments ultra-transformés en fonction de la consommation de protéines ou du régime alimentaire suivi. Gehring et al. ont montré que les individus suivant un régime végétalien consommaient plus de produits ultra-transformés que les individus non-végétariens, et avaient à la fois un score hPDI et un score uPDI plus élevés (Gehring et al., 2021). Or, nous avons vu qu'une plus forte adhésion au score hPDI était associée à un risque réduit de maladies non transmissibles ou mortalité, et que l'inverse était observé pour une forte adhésion au score uPDI. On peut également constater que, dans sa construction, le score hPDI favorise les aliments végétaux considérés bons pour la santé, qui sont majoritairement des aliments peu transformés (légumes, légumineuses, céréales complètes, …). A l'inverse, le uPDI mesure l'adhésion à une alimentation plutôt basée sur des aliments végétaux considérés comme à limiter (jus de fruits, céréales complètes, boissons sucrées) et qui pour certains peuvent être considérés comme des aliments transformés, voire ultra-transformés. Ainsi, il nous a semblé pertinent d'étudier les relations entre la contribution énergétique des différents groupes de la classification NOVA et la qualité de l'alimentation (évaluée avec le PANDiet et les scores PDI). Nous avons également voulu étudier si la consommation d'aliments plus ou moins transformés était associée à un profil différent de consommation de protéines animales et végétales.

Alors que la plupart des études se sont focalisées sur la consommation d'aliments ultra-transformés, nous avons intégré dans notre étude la consommation d'aliments peu transformés et d'aliments transformés (groupes 1 et 3 de la classification NOVA). Finalement, nous avons également utilisé le modèle EpiDiet (Evaluate the Potential Impact of a Diet) afin d'estimer la mortalité évitée ou ajoutée par maladies cérébrovasculaires, coronarienne ou diabète associée à une forte contribution des aliments peu transformés, transformés ou ultra-transformés à l'apport énergétique. Le modèle EpiDiet est un modèle basé sur une évaluation comparative des risques (Comparative Risk Assesment) qui permet de comparer des scénarios en utilisant les relations entre consommations alimentaires et risque de mortalité par maladies non-transmissibles établies par des études épidémiologiques (Ezzati et al., 2003; Kesse-Guyot et al., 2020). Cette étude est présentée dans l'**article n°2** et a pu être réalisée en appliquant la classification NOVA à l'étude INCA3 en prenant en compte l'origine et le mode de préparation des aliments consommés par chaque individu.

Finalement, nous avons également vu dans l'introduction que les substituts végétaux pourraient favoriser l'adoption de régimes plus végétalisés en facilitant le remplacement des produits animaux par un aliment ayant le même usage. Cependant, certains de ces substituts

végétaux peuvent être considérés comme ultra-transformés (Bohrer, 2019; Boukid, 2020). Ainsi, dans le cadre de modélisations de régimes alimentaires incluant la consommation de substituts végétaux, nous avons voulu étudier dans quelle mesure l'intégration de substituts végétaux affecterait la contribution des aliments-ultra-transformés à l'apport énergétique. Ces résultats sont présentés dans les **articles n°4 et 5**.

- **Développement et validation d'un score de « sécurité nutritionnelle »**

Au cours de cette thèse, nous avons principalement utilisé le PANDiet comme indicateur de la qualité de l'alimentation, par la mesure de l'adéquation nutritionnelle générale. Ce score présente l'avantage de prendre en compte un grand nombre de nutriments et d'apporter ainsi une vision globale de l'adéquation en nutriments, à la fois ceux dont une référence nutritionnelle à atteindre a été définie et ceux dont la consommation est à limiter. Cependant, au sein des scores de modération et d'adéquation, les probabilités d'adéquation de chaque nutriment ont le même poids alors que les références nutritionnelles sont différentes en fonction des nutriments : pour certains nutriments, les références sont basées sur un besoin alors que pour d'autres, les références correspondent à un Apport Satisfaisant, qui est parfois basé sur la médiane de l'apport de la population (Anses, 2021). En effet, pour certains nutriments, les experts ne sont pas en mesure d'établir précisément un besoin et d'estimer les signes de déficiences associés à une insuffisance d'apport (Anses, 2021; Otten et al., 2006). De même, pour les nutriments dont un BNM est défini, ce besoin est parfois défini sur la base d'un risque de carence mais correspond souvent à un apport permettant de constituer des réserves, d'optimiser certaines fonctions métaboliques ou de réduire le risque de maladies chroniques (Anses, 2021; Otten et al., 2006). Au niveau du score PANDiet, les probabilités du score de modération ont également plus de poids que le score d'adéquation. En effet, le score de modération est la moyenne des probabilités de 6 nutriments alors que le score d'adéquation est la moyenne des probabilités de 26 nutriments. Finalement, une même valeur de PANDiet peut masquer des profils très différents d'adéquations en nutriment, qui n'auraient pas nécessairement les mêmes conséquences sur la santé.

Ainsi, nous avons voulu créer un indice se focalisant uniquement sur le risque de carence et qui mesurerait le risque « à court-terme » d'une alimentation déséquilibrée plutôt que les risques associés aux maladies chroniques. Cet indice correspondrait à un indice de « sécurité nutritionnelle » au niveau des apports des individus et des risques liés à l'insuffisance. Il contient moins de nutriments, uniquement ceux pour lesquels une carence liée à une insuffisance d'apports est référencée, et avec des références plus basses, correspondant au risque de carence. Cette indice pourrait ainsi être un outil complémentaire au PANDiet et aux modèles prédictifs qui évaluent le risque de maladies chroniques, ou de mortalité associée à ces maladies, à partir des consommations alimentaires. Dans l'**article n°3** nous abordons le développement de ce score, appelé SecDiet, et sa validation à partir de données issues de deux populations : l'étude INCA3 et l'étude NutriNet-Santé. Ce score ainsi développé sera utilisé en application dans les **articles n°4, 5 et 6**.

1.2. Modélisations de régimes alimentaires où les produits animaux sont substitués par des produits végétaux

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, les modélisations de régimes alimentaires permettent d'étudier l'impacts de substitutions entre aliments sur les apports nutritionnels, tout en gardant le reste de l'alimentation constant. Cela permet également de comparer plusieurs scénarios prospectifs et d'évaluer les impacts que des changements d'alimentation pourraient avoir sur les critères évalués (comme les apports en nutriments, par exemple). Nous avons ainsi voulu étudier différents scénarios où les produits animaux seraient remplacés dans le régime alimentaire par des produits végétaux.

- **Substitution des aliments sources de protéines animales par un ensemble d'aliments sources de protéines végétales, avec un degré varié de diversité**

Cifelli et al. ont modélisé des régimes où la consommation d'aliments végétaux ou d'aliments végétaux riches en protéines (légumineuses, fruits à coque, graines, soja) était doublée par rapport aux consommations observées, tout en réduisant de la même quantité la consommation de produits animaux (Cifelli et al., 2016). Ils ont estimé les modifications que ce changement entraînerait sur les apports en nutriments mais ont constaté que comme la consommation initiale d'aliments riches en protéines végétales était faible, simuler le doublement de leur consommation n'avait eu que peu d'impact (Cifelli et al., 2016). Nous avons souhaité utiliser une démarche un peu différente en remplaçant graduellement tous les aliments sources de protéines animales par des aliments sources de protéines végétales puis nous avons évalué le PANDiet pour ces différents scénarios. Cela nous permet d'évaluer l'effet de l'amplitude d'une transition des protéines animales vers les protéines végétales.

Dans l'**article n°1**, nous avons d'abord voulu étudier comment évoluerait la qualité de l'alimentation, évaluée avec le PANDiet, si pour un individu, les aliments sources de protéines animales étaient graduellement remplacés par les aliments sources de protéines végétales qu'il consomme déjà. Ce travail permet ainsi d'évaluer si le répertoire alimentaire des français et le profil d'apports en protéines végétales, est suffisant pour une transition satisfaisante vers un régime plus végétal, c'est-à-dire qui ne compromette pas la qualité de l'alimentation, ou s'il est nécessaire de faire appel à un profil de consommation de produits végétaux qui soit différent de celui observé initialement.

Afin de satisfaire les besoins en acides aminés, il est souvent recommandé de diversifier et d'associer différentes sources de protéines végétales, comme les légumineuses et les céréales (Mariotti, 2017). Un minimum de diversité permet d'assurer que les apports en lysine soient suffisants quand l'apport protéique est suffisant et la diversité, en incluant des aliments riches en protéines permet d'assurer des apports protéiques suffisants (Mariotti & Gardner, 2019). Notamment, de Gavelle et al. avaient montré que lors d'une augmentation de la part de protéines végétales dans l'alimentation, utiliser un mélange de légumineuses, fruits à coque et graines permettait de maintenir l'adéquation des apports en protéines, et par suite en acides aminés (de Gavelle et al., 2017). Cependant, il a été peu étudié si cette diversité des sources de protéines végétales était également importante pour maintenir une bonne adéquation nutritionnelle lors de la substitution des protéines animales par des protéines végétales. Dans l'**article n°1**, nous avons donc modélisé des régimes alimentaires où les aliments sources de

protéines animales étaient progressivement remplacés par l'introduction d'un mélange d'aliments sources de protéiques végétales, en faisant varier les proportions de chaque groupe d'aliments pour étudier différents degrés de diversité protéique végétale.

- **Substitution de la viande, du lait ou des desserts lactés par des substituts végétaux et impacts sur la qualité de l'alimentation**

Dans l'introduction bibliographique, nous avons vu que la composition nutritionnelle des substituts de viande ou des boissons végétales a déjà été étudiée et comparée à celle de la viande ou du lait (Bohrer, 2019; Chalupa-Krebzdak et al., 2018; Curtain & Grafenauer, 2019; De Marchi et al., 2021; Vanga & Raghavan, 2018). Ces études montrent des profils différents en nutriments entre les produits animaux et leur substitut végétal équivalent. Certaines études ont également montré que le profil en nutriments de substituts végétaux variait en fonction des ingrédients utilisés (Chalupa-Krebzdak et al., 2018; Fresán et al., 2019; Vanga & Raghavan, 2018). Cependant, ces comparaisons ne permettent pas d'estimer dans quelle mesure remplacer les produits animaux par des substituts végétaux impacterait les apports en nutriments. En effet, l'impact d'une substitution entre aliments dépend du niveau initial de consommation de l'aliment substitué et également du profil initial d'apports nutritionnels dans la population. Réduire les apports d'un nutriment qui est déjà consommé en quantité largement suffisante aura peu d'impact en comparaison avec un nutriment pour lequel les apports sont déjà insuffisants.

Dans l'**article n°4** nous avons modélisé des régimes où nous avons remplacé toute la viande, le lait ou les desserts lactés consommés par leur équivalent végétal (substitut de viande, boisson végétale ou dessert végétal). Nous avons étudié les effets sur la qualité de l'alimentation (évaluée avec le PANDiet) et la sécurité nutritionnelle (évaluée avec le SecDiet) de ces régimes modélisés, par rapport aux régimes observés. Pour mener ce travail, nous avions besoin d'une base de données de substituts végétaux avec la composition nutritionnelle détaillée en macro et micronutriments. Les informations nutritionnelles présentes sur les emballages alimentaires des substituts végétaux commercialisés n'étaient pas suffisantes car la réglementation n'impose pas l'affichage de la composition en vitamines et minéraux. Nous avons en revanche pu constituer une base de données de 96 substituts de viande (légumes secs inclus), boissons ou desserts végétaux à partir des bases CIQUAL 2016, CIQUAL 2020 et de la table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (Anses, 2016d, 2020; Etude NutriNet-Santé, 2013). Cette base ainsi constituée était suffisamment complète pour que, au sein de chaque catégorie de substitut (substituts de viande, boisson ou dessert végétal), nous puissions comparer les substituts de deux manières différentes : en fonction de l'ingrédient principal constituant le substitut (par ex., soja, blé, amande, …) ou en fonction du type de substitut (par ex., galette végétale ou produit pané pour les substituts de viande, boisson nature ou boisson sucrée enrichie en calcium pour les boissons végétales). Nous avons étudié séparément la substitution de la viande, du lait et des desserts lactés pour évaluer les impacts spécifiques à chaque catégorie d'aliments. Nous nous sommes focalisés uniquement sur ces trois catégories de produits car, comme nous l'avons abordé dans l'introduction, les boissons végétales, substitut de viande et desserts végétaux sont les catégories de substituts les plus consommées (ProVeg International, 2020). Les autres substituts végétaux sont encore des produits très émergents et nous avions peu de données de composition nutritionnelle.

- **Substitution de la viande, du lait et/ou des desserts lactés par des substituts végétaux et impacts sur la mortalité et le risque de carence**

Alors que dans l'article n°4, nous avons étudié indépendamment l'intégration de substitut de viande, de boisson végétale ou de dessert végétal dans le régime alimentaire des français, dans l'**article n°5** nous nous sommes intéressés à l'impact de l'intégration de ces trois types de substituts en même temps, en substitution de la viande, du lait et des desserts lactés. Ainsi, nous avons construit des scénarios où toute la viande, le lait et les desserts lactés consommés par les individus étaient remplacés par des substituts végétaux. En effet, les individus réduisant leur consommation de produits animaux et adoptant un régime végétarien semblent à la fois consommer des substituts de viande et de produits laitiers (Allès et al., 2017; Kathryn Bradbury et al., 2017; Orlich et al., 2014). Ainsi, il semblait pertinent d'estimer l'effet global de la substitution de la viande, du lait et des desserts lactés. Par rapport à l'article n°4 où nous avons testé de nombreux scénarios avec différents substituts, nous avons limité le nombre de scénarios et nous avons utilisé des substituts « moyens » pour les substituts de viande, les boissons végétales et les desserts végétaux correspond à la composition nutritionnelle moyenne des substituts végétaux de notre base de données.

Pour ce travail, nous avons souhaité évaluer différemment les impacts de la substitution des produits animaux par des substituts végétaux et en plus d'évaluer le risque de carence avec le SecDiet nous avons estimé l'impact de ces substitutions sur la mortalité par maladies chroniques. Pour ce faire, le modèle PRIME (Preventable Risk Integrated ModEl) a été employé à cet effet (Briggs et al., 2019; Scarborough, Harrington, et al., 2014). Comme pour le modèle EpiDiet, le modèle PRIME est basé sur les relations établies par des études épidémiologiques entre consommation alimentaire, activité physique, consommation d'alcool, tabagisme et risque de mortalité par maladies non-transmissibles. Cependant, comparé à l'étude faite avec le modèle EpiDiet dans l'article n°2, nous avons pris en compte un plus grand nombre de maladies et évalué la mortalité par maladies cardiovasculaires, par cancers et par diabète. Nous avons ainsi estimé la mortalité évitée ou ajoutée associée à un changement d'alimentation entre les régimes simulés (où les produits animaux sont remplacés par des substituts végétaux) et les régimes observés.

1.3. Optimisations mathématiques afin d'évaluer les potentiels des substituts à la viande dans une alimentation saine

Alors que les travaux de substitutions permettent d'évaluer les impacts de différents scénarios de changement d'alimentation, l'optimisation mathématique des régimes permet d'évaluer quels changements seraient nécessaire afin d'atteindre au mieux un objectif donné. Dans le cadre de cette thèse, nous avons utilisé des méthodes d'optimisation afin d'étudier la place que pourrait avoir les substituts de viande dans une alimentation plus saine.

- **Optimisation de la composition nutritionnelle d'un substitut de viande**

Comme évoqué précédemment, les substituts de viande ont une composition nutritionnelle différente de celle de la viande. Le travail réalisé dans l'article n°4 nous a également permis

d'étudier les impacts potentiels sur la qualité de l'alimentation de remplacer la viande par des substituts végétaux dans le régime alimentaire de la population française. Ce travail permet notamment d'étudier l'impact sur la qualité de l'alimentation des substituts végétaux en fonction de l'ingrédient principal constituant le substitut.

La formulation de certains substituts de viande se fait dans l'objectif de reproduire le goût et la texture de la viande et également la composition nutritionnelle, qui se limite généralement à la teneur en protéines, et parfois en lipides (Bohrer, 2019; Boukid, 2020). Les substituts de viande peuvent également être enrichis en certains micronutriments pour atteindre des teneurs similaires à la viande (Boukid, 2020). Alors que certains ingrédients sont sélectionnés pour leurs propriétés technologiques (comme par ex. les protéines de blé pour donner une texture fibreuse) il nous a semblé pertinent d'étudier quels ingrédients pourraient être utilisés pour améliorer la composition nutritionnelle des substituts de viande.

Van Mierlo et al. ont mené une démarche intéressante en optimisant les ingrédients d'un substitut de viande afin qu'il ait une composition nutritionnelle au moins équivalente à celle de la viande de bœuf ou de poulet pour certains nutriments (Van Mierlo et al., 2017). Cependant, leur travail ne prenait en compte qu'un nombre limité de nutriments (protéines, acides aminés, fer, zinc, vitamine B12), ne considérait pas leur absorption, ne prenait pas en compte des contraintes technologiques liées à la formulation des produits (à l'exception de la teneur en eau) et n'utilisait que des ingrédients que l'on pourrait qualifier d'ultra-transformés (isolats/concentrés de protéines). Ainsi, nous nous sommes demandés s'il serait possible d'optimiser la composition nutritionnelle d'un substitut de viande en n'utilisant que des ingrédients « communs », c'est-à-dire en considérant seulement des ingrédients que l'on pourrait trouver facilement dans une cuisine (légumes secs, huiles végétales, céréales, légumes, …). En effet, il y a une prise de conscience des consommateurs sur la composition des produits alimentaires et une volonté de consommer des produits plus naturels (bien que la définition et la perception de la naturalité ne soit pas un concept clairement défini) (Román et al., 2017). Dans ce contexte, il y a une tendance depuis plusieurs années dans l'industrie agroalimentaire de formuler des produits avec une démarche « Clean Label », où l'objectif est de réduire les allergènes, les additifs, le nombre d'ingrédients utilisés et de remplacer les ingrédients artificiels par des ingrédients naturels (Asioli et al., 2017). En outre, raisonner une recette sur une base d'ingrédients simples permet aussi de proposer un substitut qui puisse être élaboré à la maison et qui combine de façon pratique et avantageuse des aliments intéressants nutritionnellement sous forme d'ingrédient dans un aliment, comme on combinerait des aliments dans un repas.

Van Mierlo et al. ont optimisé la composition nutritionnelle du substitut de viande en prenant la viande de poulet et de bœuf comme référence (Van Mierlo et al., 2017). Nous avons voulu utiliser une approche différente en déterminant la composition de manière à ce que le substitut améliore le plus possible la qualité de l'alimentation lorsqu'il est consommé à la place de la viande. Cela permet d'étudier quels seraient les leviers pour qu'un aliment introduit dans le répertoire alimentaire améliore l'adéquation nutritionnelle et permette de résoudre certains déséquilibres nutritionnels. Ainsi, nous avons développé un modèle d'optimisation non linéaire dont l'objectif était de maximiser le score PANDiet d'un régime alimentaire dans lequel la viande est remplacée par un substitut de viande dont la composition se fait à partir d'un répertoire d'ingrédients. Les variables d'état du modèle d'optimisation étaient les proportions des ingrédients du substitut. Nous avons également ajouté des contraintes technologiques afin de concevoir un substitut qui pourrait être formulable en conditions réelles et des

contraintes de sécurité nutritionnelle pour éviter un risque plus élevé de carence pour certains nutriments (en utilisant le SecDiet). La démarche utilisée et les résultats obtenus sur la composition « optimale » d'un substitut de viande sont présentés dans l'**article n°6**.

- **Optimisation de régimes alimentaires incluant la consommation de substituts à la viande**

Dans l'introduction, nous avons abordé les interrogations concernant le rôle que pourrait avoir les substituts végétaux dans une alimentation durable. De nombreuses études ont utilisé des méthodes d'optimisation mathématique pour modéliser des régimes alimentaires plus durables (Gazan et al., 2018). L'optimisation des régimes se fait sur la base des régimes observés, et se limite donc généralement aux aliments déjà consommés par les individus ou la population, afin de limiter l'écart aux régimes observés. Cependant, le principe des substituts de viande est de remplacer facilement la viande dans un repas, sans nécessiter un changement trop important de la structure des repas (Schösler et al., 2012). La substitution des produits animaux par des substituts végétaux pourrait être une première étape pour améliorer la qualité des régimes alimentaires sans trop nécessiter de changer ses habitudes alimentaires avant d'engager une révision plus profonde du reste de l'alimentation.

Nous avons ainsi voulu étudier si les substituts de viande pourraient favoriser des profils alimentaires sains, sans compromettre les apports nutritionnels. Nous avons utilisé un modèle d'optimisation des régimes développé par Dussiot et al., où la quantité de 45 groupes alimentaires est optimisée de manière à maximiser une fonction « profil alimentaire sain » tout en minimisant l'écart au régime observé (Dussiot et al., 2021). La fonction « profil alimentaire sain » cherche à augmenter la consommation de légumes, fruits et céréales complètes et réduire la consommation de viande rouge, charcuterie et boissons sucrées, sur la base des relations établies par l'Anses entre la consommation de groupes d'aliments et le risque de maladies chroniques (Anses, 2016b). Cette fonction permet de modéliser des profils de consommations alimentaires qui sont considérés favorables à la santé à long terme. Ce modèle d'optimisation contient également des contraintes afin d'assurer que les régimes optimisés apportent des quantités suffisantes de nutriments. Dans l'**article n°7**, nous avons cherché à optimiser des régimes alimentaires en partant d'une situation où des substituts de viande sont introduits dans le répertoire alimentaire potentiel. L'objectif était notamment d'évaluer si l'intégration de substituts de viande permettrait de favoriser la réduction de la consommation de viande, tout en limitant la déviation par rapport aux régimes observés. Nous avons étudié deux substituts de viande : le substitut « optimisé » obtenu dans l'article n°6 et un substitut « moyen » correspondant à la composition nutritionnelle moyenne des substituts de viande de notre base de données. Nous avons également évalué l'intérêt d'un enrichissement de ces substituts en fer et en zinc pour favoriser la réduction de la consommation de viande et l'obtention de régimes modélisés avec un profil plus sain.

2. Articles

Les travaux réalisés pendant cette thèse sont présentés sous le format d'articles (publiés, soumis ou en cours de rédaction). Les **articles n°1 à 4**, qui ont été publiés, sont présentés en anglais sous leur format accepté (post-print). L'**article n°5** est rédigé en français et présente des résultats préliminaires, il n'est pas destiné à être soumis sous cette forme. L'**article n°6** est présenté sous le format dans lequel il a été soumis. L'**article n°7** est en cours de rédaction et est présenté dans sa version la plus aboutie. Tous les articles sont précédés d'un résumé en français et suivis des données supplémentaires associées.

2.1. Article n°1 : La diversification des sources de protéines végétales est primordiale pour assurer l'adéquation nutritionnelle lors de la substitution des protéines animales par les protéines végétales dans la population adulte française (INCA3).

Résumé

Contexte : Réduire sa consommation de protéines animales au profit des protéines végétales est préconisé pour réduire l'impact environnemental de l'alimentation. Une consommation plus importante de protéines végétales est associée à des effets bénéfiques sur la santé et une alimentation de meilleure qualité. Dans le cadre d'une alimentation plus végétale, diversifier ses sources de protéines végétales est généralement recommandée pour assurer de bons apports nutritionnels. Cependant, les relations entre qualité et diversité de l'alimentation ne sont pas claires, d'autant plus à l'échelle des sources de protéines.

Objectifs : Evaluer les associations entre qualité, diversité de l'alimentation et consommation de protéines végétales et évaluer le rôle de la diversité des sources de protéines végétales pour assurer la qualité de l'alimentation lors de l'augmentation de la consommation de protéines végétales.

Méthode : A partir d'un sous-échantillon (n=1341, 18-64 ans) de la population adulte de l'étude INCA3 (2014-2015), nous avons étudié les associations entre la qualité de l'alimentation (en utilisant le score PANDiet et les sous-scores d'adéquation (AS) et de modération (MS) associés), la diversité de l'alimentation (évaluée selon plusieurs dimensions) et la consommation de protéines végétales. Puis, pour chaque individu, nous avons simulé la substitution d'aliments protéiques animaux par des aliments protéiques végétaux selon plusieurs scénarios : selon que l'individu conserve le même répertoire alimentaire ou intègre un nouveau mélange d'aliments protéiques végétaux, avec plusieurs niveaux croissants de diversité protéique végétale.

Résultats : Les diversités globales et protéiques sont peu associées au PANDiet, positivement associées à l'AS et négativement associées au MS. En revanche, le PANDiet est positivement associé à la diversité protéique végétale. La consommation de protéines végétales est positivement associée au PANDiet et au MS mais pas à l'AS. La plupart (61%) des protéines végétales proviennent des céréales et une plus forte consommation de protéines végétales, du fait d'une contribution croissante des céréales, est associée à une moindre diversité protéique végétale. La substitution des aliments protéiques animaux par des aliments protéiques végétaux augmente fortement le MS (jusqu'à +32%), mais tend à diminuer l'AS (jusqu'à -20%), d'autant plus que les protéines végétales utilisées sont peu diversifiées. L'AS est stable (+1,5%) lorsque les substitutions sont réalisées avec un mélange fortement diversifié de protéines végétales. Les substitutions entraînent un profil d'adéquation différent en nutriments, avec de moins bonnes probabilités d'adéquation pour les nutriments généralement apportés par les aliments d'origine animale.

Conclusion : Nos résultats ne montrent pas de relation entre la diversité globale de l'alimentation et la qualité de l'alimentation. Nous montrons qu'en revanche des apports en protéines végétales plus diversifiés sont associés à des apports nutritionnels plus adéquats. Actuellement, l'apport protéique végétal est peu diversifié ce qui limite les effets bénéfiques de remplacer les protéines animales par des protéines végétales. Dans ce contexte de

transition alimentaire, il s'avère nécessaire d'augmenter la contribution des céréales complètes, légumineuses, fruits à coque et graines à l'apport protéique végétal.

Valorisation : Ce travail a été publié dans la revue *The Journal of Nutrition* (Volume 150, n°3, mars 2020). La version présentée ci-après n'est pas la version publiée, mais la version acceptée pour publication dans *The Journal of Nutrition* après examens par des pairs. La version, après travail d'édition, publiée, est disponible sur le lien suivant : https://doi.org/10.1093/jn/nxz252

Messages clés

- La diversité de l'alimentation est faiblement associée à la qualité de l'alimentation.
- Environ un tiers des protéines consommées sont d'origine végétale et les céréales sont le principal contributeur de protéines végétales.
- Une consommation plus importante de protéines végétales est associée à une alimentation de meilleure qualité mais à une moins bonne diversité des sources de protéines végétales du fait d'une contribution plus importante des céréales à l'apport protéique végétal.
- Substituer les aliments protéiques animaux par des aliments protéiques végétaux est associé à des apports moins excessifs en nutriments à limiter mais le profil actuel de consommation de protéines végétales ne permet pas de maintenir l'adéquation nutritionnelle. Seule la substitution par un mélange diversifié d'aliments protéiques végétaux permet de maintenir une adéquation nutritionnelle similaire, bien que le profil d'adéquation en nutriments soit modifié.

Plant protein diversity is critical to ensuring the nutritional adequacy of diets when replacing animal with plant protein – observed and modelled diets of French adults (INCA3).[1,2,3,4]

Marion Salomé [5], Erwan de Gavelle [5], Ariane Dufour [6], Carine Dubuisson [6], Jean-Luc Volatier [6], Hélène Fouillet [5], Jean-François Huneau [5], François Mariotti [5,*]

[5] UMR PNCA, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France
[6] Risk Assessment Department, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES), Maisons-Alfort, France

***** Corresponding author: François Mariotti, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France, francois.mariotti@agroparistech.fr

Authors' last names: Salomé, de Gavelle, Dufour, Dubuisson, Volatier, Fouillet, Huneau, Mariotti.
4824 words for the entire manuscript (introduction to discussion)
2 figures
2 tables
1 OSM (1 supplemental method, 13 supplemental tables)
Running title: Plant protein diversity and nutritional adequacy.

[1] The authors reported no funding received for this study.
[2] Author disclosures: M Salomé's PhD fellowship is currently being funded in part by a research contract with *Terres Univia*, the French Interbranch organization for plant oils and proteins. F Mariotti is the scientific leader of this contract. E de Gavelle, A Dufour, C Dubuisson, JL Volatier, H Fouillet, JF Huneau: no conflicts of interest.
[3] Supplemental Method 1, Supplemental Tables 1-13 are available via the "Online Supporting Material" link in the online posting of the article and via the same link in the online table of contents at jn.nutrition.org.
[4] Abbreviations used:
ALA, alpha-linolenic acid; Anses, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety; APF, Animal-protein foods; AS, Adequacy Subscore; BI, Berry-Index; INCA3, Third Individual and National Study on Food Consumption Survey; JD, Jaccard Distance; LA, linoleic acid; MS, Moderation Subscore; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; PF, Protein foods.

Abstract

Background. There is a current trend in western countries towards increasing the intake of plant protein. A higher plant protein intake has been associated with nutritional and health benefits, but these may depend on the pattern of plant protein sources.
Objective. We hypothesized that the diversity of plant foods could be important to nutrient adequacy when increasing plant protein intake in the diet.
Methods. Using data on 1341 adults (18-64y) from a representative French national dietary survey conducted in 2014-2015 (INCA3), we studied the links between plant protein intake, dietary diversity (using various dimensions) and nutrient adequacy (assessed using the PANDiet scoring system, comprising adequacy (AS) and moderation (MS) sub-scores). We simulated substituting plant-protein foods for animal-protein foods using different models of plant protein diversity.
Results. We found that overall diet quality was weakly associated with total and protein diversity and more strongly with plant protein diversity. Plant protein intake was inversely associated with animal protein intake, and positively with the PANDiet and MS, but not with the AS. Plant protein intake displayed little diversity, mostly taking the form of grains (61% of plant protein intake), and this diversity was even less marked under a higher plant protein intake. Finally, modelled substitutions showed that reducing animal protein intake increased the MS (by 32%) in a similar manner whichever plant protein was used for substitution, whereas it decreased the AS (by 20%) unless using a much diversified plant protein mix. These simulated improvements in overall adequacy included marked decreases in adequacy regarding certain nutrients that are typically of animal origin.
Conclusion. We conclude that in French adults the current pattern of plant protein intake is hindering the nutritional benefits of a transition towards more plant protein, indicating that the consumption of plant protein-based foods other than refined grains should be encouraged.

Keywords: plant protein; animal protein; diet quality; nutrient adequacy; dietary diversity; food substitution.

Introduction

There is a general consensus that feeding the world in 2050 within planet boundaries will require important transformations of the food system, such as reducing food waste and profoundly changing our diets (1,2). The dietary changes anticipated include an increase in the consumption of healthy contributors (fruits, vegetables, nuts, seeds and legumes) at the expense of other foods such as red meats and sugary products (1). Protein consumption is one of the biggest issues because the production of animal protein has important ecological impacts (3,4) and makes the highest contribution to protein intake in western countries (5,6).

In western countries, people have started to reduce their meat consumption for reasons that include health, environmental, ethical or economic issues (7–10). Dietary guidelines and public health messages are also consistent with a shift toward more plant protein, setting upper levels for red meat and advocating an increase in plant-based foods such as legumes and nuts (11,12). Positive health outcomes have been associated with consumption of the latter, such as lower risks of cancer (13,14), coronary heart disease (15) and total mortality (16), especially when “healthy” plant-based diets are concerned (15,17). It is now considered that plant protein sources are not alike, since they are coming with different nutrients and other substances, and have differential associations with cardio metabolic risk (18,19).

When considering a more plant-based diet, its diversity is generally recommended because mixing protein types has long been viewed as being necessary to obtain an adequate intake of indispensable amino acids (5,20). Classic protein-rich plant such as legumes are presented as a good nutritional lever to increase the share of plant protein in the diet. However, it is also expected that people who are willing to increase their plant protein intake may tend to pursue their prevailing pattern of intake rather than choosing to expand their food repertoire. Yet, the current plant protein pattern varies little in western diets, mainly consisting of contributions from grain products (6). It is still not known how far reliance on current plant protein patterns might ensure the nutrient adequacy of the diet and its long-term health benefits.

As a general rule, diversity is often considered as a good indicator or even determinant of dietary quality. Indeed, dietary diversity is often recommended in dietary guidelines as a means of improving nutrient adequacy (21,22). However, recent studies in western countries have revealed that dietary diversity may also be associated with higher food consumption, body weight or BMI (23,24) and a higher intake of the unhealthy foods that are currently available. There is no consensus regarding the measurement of diversity and a wide variety of diversity scores have been developed, some of which include a health component in the diversity score (25). In fact, in terms of diet quality, it may be more relevant to consider diversity within food groups or nutrients that are associated with diet quality, such as total protein or plant proteins.

We hypothesize that plant protein diversity may be important to diet quality, and that the lack of variation in the background pattern of protein intake in western countries may limit the favorable effects of a higher plant protein intake on nutritional adequacy of the diet. To study this question, we decided to characterize the relationships between nutrient adequacy, dietary diversity and protein intake, and assess the importance of plant protein diversity to nutrient adequacy using models for substituting animal protein with plant protein.

Subjects and methods

Study population

The data used in this study were extracted from 24h-dietary recalls of adults involved in the third Individual and National Study on Food Consumption survey (INCA3) performed in mainland France between February 2014 and September 2015, and fully described elsewhere (26,27). Participants aged between 18 and 64 years were included in the study (the nutrient requirements of adults over 65 years old differing from those of younger adults) and participants identified as being under-reporters in INCA3 study (28) were excluded, using the basal metabolic rate as estimated by Henry equation (29) and the cut-off values proposed by Black (30). The final sample thus contained 1341 adults (564 men and 777 women).

Dietary intakes were assessed using a series of three non-consecutive 24h-dietary recalls (two on weekdays and one at the weekend) over a 3-week period. The participants were asked by phone to declare all the foods and beverages they had consumed during the day before the call. They were not aware of the days of recall so they could not anticipate and change their food consumption accordingly. Portion sizes were estimated using validated photographs. Dietary records were collected by professional investigators assisted by dietary software. The different nutrient contents of the foods were extracted from the 2016 database from the *French Centre d'Information sur la Qualité des Aliments*. Food items were gathered into food sub-groups (Supplemental Table 1), based on the classification used in the INCA3 database (26).

Measurement of the nutrient adequacy of the diet

The nutrient adequacy of the diet was assessed using the PANDiet 3.0 scoring system, based on the dietary reference intake from the 2016 Anses opinion (31). PANDiet is a 100-point score that measures individual diet quality by assessing the probability of an adequate overall nutrient intake. It is the mean of two sub-scores: the adequacy sub-score (AS) and the moderation sub-score (MS); the higher the score, the better the nutrient adequacy. AS is the average probability of the adequacy of twenty-eight nutrients whose usual intake should be above a reference value, multiplied by 100. MS is the average probability of the adequacy of six nutrients for which an upper bound reference value exists (Supplemental Table 2). The complete construction of the score is described elsewhere (32,33).

Identification of protein sources

Food items were broken down into their ingredients and each ingredient was assigned to a food family according to their origin, as previously described (34). Proteins from ingredients could thus be identified as relating to animal or plant food. Animal sources of protein were identified from the following animal-based food families: 'Red meat', 'Poultry', 'Fish', 'Processed meat', 'Cheeses', 'Milk', 'Yogurt', 'Eggs', 'Other meats' and 'Other dairy products'. Likewise, plant sources of proteins were identified from the following plant-based food families: 'Grains' ('Refined grains' and 'Whole grains'), 'Legumes', 'Nuts and seeds', 'Fruits', 'Vegetables', 'Potatoes' and 'Other vegetables'.

Moreover, a classification of food items and sub-groups was used to identify protein foods and protein food groups, as previously described (32). Food items included in the INCA3 study were classified as protein foods (PF) if they met two criteria: the percentage energy from protein was >10% and the level of intake at the 90th percentile was >5g protein per portion consumed. PF with protein coming entirely from plant sources were defined as plant-protein

foods (PPF) and PF with protein coming entirely from animal sources were defined as animal-protein foods (APF).

Then, protein food groups were defined as food sub-groups consumed by >10% of the population (at least one consumption over the three days of report) and where, upon all food items composing the sub-group, >25% were protein foods (PF), as previously described (32) (Supplemental Table 1).

In what follows, 'plant protein' refers to protein from all plant foods, including those from plants that are not considered as protein-rich plants. In the same way, 'animal protein' refers to protein from all animal foods.

Measurement of dietary diversity

Dietary diversity was determined in several dimensions, as suggested by de Oliveira Otto *et al.,* in order to characterize the different aspects of diversity: count, evenness of the distribution of food intake and dissimilarity of the food items consumed (35). Total diversity, protein diversity and plant protein diversity were all evaluated, and nine diversity scores were chosen to best describe the three dimensions of diversity at its three different levels (Supplemental Method and Supplemental Table 3). Briefly, the count was characterized as the number of different sub-groups consumed. Evenness, which reflected the satisfactory distribution of energy or protein intake among food groups, was measured using the Berry-Index (BI), defined as $1 - \sum_{i=0}^{n} {s_i}^2$, where s_i is the share of food group i in the total amount of energy, protein or plant protein intake, and n is the total number of food groups (25,35,36). Dissimilarity, which measured the extent to which food items differed from a nutritional standpoint, was estimated using the Jaccard distance (JD), calculated by estimating the number of attributes in common (here, nutrients) between two food items x and y and unique to each food item, as follows: $JD_{xy} = \frac{B_x + C_y}{A_{xy} + B_x + C_y}$, where A_{xy} is the number of attributes shared by x and y; B_x is the number of attributes unique to x and C_y is the number of attributes unique to y (35).

Simulations of substituting plant-protein foods for animal-protein foods

For each individual in the sample, we simulated substitutions of APF (animal-protein foods - protein foods as defined above and only composed of animal protein) with the same amount of energy, without alcohol, from PPF (plant-protein foods as defined above).

In a first model, APF were replaced by PPF initially consumed by individuals in order to maintain the same initial food pattern within the individual's food repertoire (in cases where individuals were not consuming PPF on a given day, substitutions were made by considering all the plant foods initially consumed by the individuals).

In a second model, APF were replaced by introducing a new mix of PPF. For each plant-based food family, a virtual average PPF was created which had the mean nutritional composition of PPF identified in the plant-based food family. This was done for the following 6 plant-based food families: 'Refined grains', 'Whole grains', 'Legumes', 'Potatoes', 'Vegetables' and 'Nuts' (Supplemental Table 4). Since no PPF were identified in 'Fruits' and 'Other vegetables' families, they were not considered in this process.

These average PPF were combined at different proportions which reflected different degrees of plant protein diversity. First, average PPF were combined according to their observed average contribution to plant protein intake in the general population ('prevailing plant protein

mix'). We then built five mixes of these average PPF by decreasing successively per 20% the relative proportion of 'Refined grains' (since it is the family that contributes most to plant protein intake – almost 55% – this was the natural lever to increase plant protein diversity) and this resulted in graded levels of plant protein diversity ('diversified plant protein mix'). Substituting PPF for 100kcal of APF involved, for example, replacing 43g of ground beef with 57g of average PPF (27g of 'Refined grains', 2g of 'Whole grains', 2g of 'Legumes', 1g of 'Nuts', 14g of 'Vegetables' and 11g of 'Potatoes') when using the 'prevailing plant protein mix', and with 91g of average PPF (8g of 'Whole grains', 10g of 'Legumes', 3g of 'Nuts', 33g of 'Vegetables' and 36g of 'Potatoes') when using the most 'diversified plant protein mix'.

Statistical analyses

The weighting schemes and adaptions of tests and confidence interval calculations proposed in INCA3 were used to account for the complex survey design and ensure the national representativeness of the sample. The food intakes of individuals were weighted according to the day of record (week day or weekend) to take account of variations between days. All protein intakes were initially adjusted for total energy intake according to the residual method (37), except for protein contribution (expressed as %) which were calculated with absolute protein intake. Differences between men and women for quality and diversity scores and protein intakes were evaluated using Student's t test. Correlations between scores were made using Spearman's correlation coefficients, and confidence intervals were estimated using Fisher's Z transformation. Continuous variables are presented as means ± SDs, and differences across quartiles or across different models of substitutions were assessed by linear models adjusting for sex. Categorical variables are presented as percentages, and differences across quartiles were determined using the χ^2 test. All analyses were performed using SAS version 9.1. Significance was set at $P<0.05$.

Results

There was no difference between sexes regarding the PANDiet score, but the AS was significantly higher in men than in women (+5.8 points) and MS was significantly lower in men than in women (-5.6 points) (Supplemental Table 5). Animal protein contributed to 67% of total protein intake. 'Red meat' was the main contributor to animal protein intake (25% of animal protein intake for men and 22% for women) and 'Grains' was the main contributor to plant protein intake (60% of plant protein intake for men and 62% for women) (Supplemental Table 5).

Associations between nutrient adequacy and total and protein diversity

The INCA3 population was divided into PANDiet quartiles (Supplemental Tables 6 and 7). Total and protein diversity based on count and evenness did not differ significantly across the PANDiet quartiles whereas dissimilarity scores for total and protein diversity were higher in the upper quartiles of PANDiet.

Spearman's correlation coefficients between the PANDiet, AS, MS and diversity scores are presented in **Table 1**. Total and protein diversity, based on count and evenness were not (or only weakly) associated with PANDiet, but were positively associated with AS (r between +0.25 and +0.39, $P<0.0001$) and inversely associated with MS (r between -0.36 and -0.18, $P<0.0001$). Dissimilarity scores for total and protein diversity were positively associated with

PANDiet (respectively +0.24 and +0.21, *P* <0.0001) and MS (respectively +0.26 and +0.22, *P* <0.0001), but poorly inversely associated with AS.

Table 1. Spearman's correlation coefficients (r) between PANDiet scores and diversity scores in the French adult population (INCA3, n=1341)[1].

	Count		**Evenness**		**Dissimilarity**	
	r (95% CI)	*P*[2]	r (95% CI)	*P*	r (95% CI)	*P*
Total diversity	"Div-Tot"		"BI-Energy"		"JD-Tot"	
PANDiet score	-0.06 (-0.12 ; -0.01)	<0.05	-0.00 (-0.05 ; 0.05)	NS	0.24 (0.19 ; 0.29)	<0.0001
Adequacy Sub-score	0.38 (0.34 ; 0.43)	<0.0001	0.25 (0.20 ; 0.30)	<0.0001	-0.06 (-0.12 ; -0.01)	<0.05
Moderation Sub-score	-0.36 (-0.41 ; -0.31)	<0.0001	-0.20 (-0.25 ; -0.15)	<0.0001	0.26 (0.21 ; 0.31)	<0.0001
Protein diversity	"Div-Prot"		"BI-Prot"		"JD-PF"	
PANDiet score	-0.02 (-0.03 ; 0.08)	NS	0.04 (-0.02 ; 0.09)	NS	0.21 (0.16 ; 0.26)	<0.0001
Adequacy Sub-score	0.39 (0.34 ; 0.43)	<0.0001	0.26 (0.21 ; 0.31)	<0.0001	-0.03 (-0.08 ; 0.03)	NS
Moderation Sub-score	-0.29 (-0.34 ; -0.24)	<0.0001	-0.18 (-0.24 ; -0.13)	<0.0001	0.22 (0.16 ; 0.27)	<0.0001
Plant protein diversity	"Ratio-PPF/PF"		"BI-PBF"		"JD-PPF"	
PANDiet score	0.16 (0.11 ; 0.21)	<0.0001	0.14 (0.09, 0.19)	<0.0001	0.07 (0.01 ; 0.12)	<0.05
Adequacy Sub-score	-0.07 (-0.12 ; -0.02)	<0.05	0.26 (0.21 ; 0.31)	<0.0001	-0.07 (-0.12 ; -0.01)	<0.05
Moderation Sub-score	0.20 (0.15 ; 0.25)	<0.0001	-0.07 (-0.12 ; -0.01)	<0.05	0.10 (0.05 ; 0.16)	<0.001

[1]Data were collected by three 24h recalls
[2]*P* values for Spearman's correlation coefficients, NS, *P* ≥ 0.05
INCA3, Individual and National Study on Food Consumption Survey 3

Associations between nutrient adequacy and plant protein diversity

Plant protein diversity scores were all positively associated with PANDiet (r between +0.07 and +0.16, *P*<0.05) (Table 1). Plant protein diversity based on evenness was positively associated with AS but not with MS. Plant protein diversity based on count and dissimilarity were positively associated with MS, but not with AS. Across the PANDiet quartiles, plant protein diversity scores were higher among participants with higher PANDiet scores. Participants with a higher PANDiet score consumed more total protein, from both animal and plant sources, with a slightly larger share of the latter (35% in fourth quartile vs 33% in first quartile) (Supplemental Table 6).

Participants with a higher PANDiet score consumed more proteins from 'Fish', 'Milk', 'Yogurts', 'Grains', 'Vegetables', 'Fruits', 'Nuts and seeds' and 'Legumes' families and fewer proteins from 'Cheese', 'Processed meat' and 'Eggs' families than participants with lower PANDiet scores. The contribution of plant-based food families to plant protein intake differed significantly across PANDiet quartiles, with a lower share of refined grains and a higher share of other plant sources, which was in line with a higher BI-PBF score (plant protein diversity defined as evenness) (Supplemental Table 6).

Association between diversity scores, nutrient adequacy and plant protein consumption

PANDiet and MS scores were higher under a higher plant protein intake (respectively +6.1 points and +12.4 points) but there was no significant difference for AS (**Table 2**). The probabilities of adequacy for AS with respect to protein, fiber, vitamin B-6, folate, magnesium and manganese, etc., were higher under a higher plant protein intake whereas the probabilities of adequacy regarding linoleic acid, vitamin B-12, potassium and zinc were lower. The probability of adequacy within the MS score was higher for total fat, saturated fatty acids, cholesterol and sugars but lower for sodium (Supplemental Table 8).

Table 2. PANDiet scores and sub-scores, diversity score, total energy and protein intakes, protein intakes from animal-based and plant-based food families according to plant protein intake quartiles in the French adult population (INCA3, n=1341)[1].

	Plant protein intake				
	Q1 (n=335) 0.00 – 24.0 g/d	**Q2 (n=335) 24.0 – 27.3 g/d**	**Q3 (n=336) 27.3 – 30.8 g/d**	**Q4 (n=335) 30.8 – 54.2 g/d**	***P*[2]**
PANDiet score (0-100)	55.8 ± 5.56[3]	58.1 ± 5.63*	59.7 ± 5.55*	61.9 ± 5.96*	<0.0001
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	64.1 ± 12.7	60.4 ± 12.5	61.6 ± 11.1*	64.0 ± 10.9	NS
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	47.4 ± 15.2	55.7 ± 12.7*	57.7 ± 13.8*	59.8 ± 13.6*	<0.0001
Total div. – Count *("Div-Tot") (0-75)*	26.4 ± 5.05	25.3 ± 4.87*	26.4 ± 4.77*	25.5 ± 5.38*	<0.0001
Total div. – Evenness *("BI-Energy") (0-1)*	0.91 ± 0.06	0.91 ± 0.04	0.91 ± 0.03*	0.88 ± 0.06*	<0.0001
Total div. – Dissimilarity *("JD-Tot") (0-1)*	0.70 ± 0.05	0.70 ± 0.04	0.70 ± 0.04*	0.71 ± 0.05	<0.01
Protein div. – Count *("Div-Prot") (0-32)*	10.2 ± 2.86	9.78 ± 2.53	10.3 ± 2.28	10.0 ± 2.56	NS
Protein div. – Evenness *("BI-Prot") (0-1)*	0.80 ± 0.09	0.81 ± 0.08	0.83 ± 0.06*	0.82 ± 0.08	NS
Protein div. – Dissimilarity *("JD-PF") (0-1)*	0.69 ± 0.04	0.69 ± 0.04	0.69 ± 0.04	0.69 ± 0.05	NS
Plant protein div. – Count *("Ratio-PPF/PF")* (0-1)	0.21 ± 0.09	0.23 ± 0.10*	0.25 ± 0.09*	0.28 ± 0.11*	<0.0001
Plant protein div. – Evenness *("BI-PBF")* (0-1)	0.59 ± 0.12	0.56 ± 0.12*	0.54 ± 0.13*	0.50 ± 0.17*	<0.0001
Plant protein div. – Dissimilarity *("JD-PPF")* (0-1)	0.64 ± 0.15	0.65 ± 0.14	0.62 ± 0.13	0.65 ± 0.12	NS
Total energy, *kcal/d*	2547 ± 806	2166 ± 788*	2167 ± 729*	2466 ± 736	NS
Total protein[4], *g/d*	84.1 ± 23.4	82.7 ± 17.9	83.2 ± 16.3	84.1 ± 18.5	NS
Animal protein[4], *g/d*	63.2 ± 23.7	57.2 ± 17.8*	54.2 ± 16.5*	48.9 ± 18.8*	<0.0001
Protein from animal-based families[4], *g/d*					
Red meat	17.3 ± 19.8	13.7 ± 16.3*	11.4 ± 11.5*	9.44 ± 14.8*	<0.0001
Cheeses	9.29 ± 8.63	8.92 ± 6.28	8.97 ± 5.95	7.87 ± 6.85*	<0.01
Poultry	7.75 ± 11.0	7.05 ± 10.2	6.88 ± 9.18	8.48 ± 11.5	NS
Processed meat	7.38 ± 9.32	6.54 ± 7.24*	6.14 ± 5.82*	4.77 ± 6.32*	<0.0001
Fish	5.50 ± 8.18	5.92 ± 8.35	6.68 ± 8.24	6.60 ± 11.4	NS
Milk	7.05 ± 8.39	5.93 ± 6.33	5.57 ± 5.46*	4.94 ± 5.70*	<0.0001
Yogurt	3.31 ± 3.73	4.08 ± 4.32	3.49 ± 2.86	3.21 ± 3.26	NS
Eggs	4.25 ± 3.51	3.60 ± 3.38*	3.43 ± 2.99*	2.81 ± 2.81*	<0.0001
Other meats (offal, game)	0.56 ± 3.33	0.82 ± 3.33	1.05 ± 4.07	0.35 ± 2.58	NS
Other dairy products (butter, cream)	0.80 ± 1.04	0.64 ± 0.75	0.61 ± 0.68*	0.46 ± 0.54*	<0.0001
Plant protein[4], *g/d*	20.8 ± 3.37	25.6 ± 1.01*	28.9 ± 1.05*	35.1 ± 4.31*	<0.0001
Protein from plant-based families[4], *g/d*					
Grains	11.2 ± 4.30	15.3 ± 3.6*	18.1 ± 3.64*	22.5 ± 6.84*	<0.0001
of which refined grains	9.97 ± 4.73	13.8 ± 4.25 *	16.3 ± 4.48 *	20.1 ± 8.25 *	<0.0001
of which whole grains	1.20 ± 1.82	1.48 ± 1.97	1.82 ± 2.49 *	2.40 ± 4.32 *	<0.0001
Vegetables	2.45 ± 1.71	2.81 ± 2.01*	3.22 ± 1.88*	3.94 ± 2.54*	<0.0001
Potatoes	1.87 ± 2.58	1.56 ± 1.74	1.74 ± 1.77	1.53 ± 2.04	NS
Fruits	1.37 ± 1.18	1.58 ± 1.33*	1.54 ± 1.08*	1.44 ± 1.22*	<0.05
Nuts and seeds	0.66 ± 1.18	1.05 ± 1.66*	1.04 ± 1.48*	1.53 ± 3.16*	<0.0001
Legumes	0.68 ± 2.01	0.75 ± 1.99	0.79 ± 1.53*	1.66 ± 3.77*	<0.0001
Other plant foods (spices, beverages)	2.64 ± 1.74	2.55 ± 1.88	2.46 ± 1.71	2.53 ± 2.64	NS
Plant protein, *% total protein*	26.6 ± 7.55	30.3 ± 7.18*	34.6 ± 7.21*	41.9 ± 8.83*	<0.0001
Protein from plant-based families, *% of plant protein*					
Grains	57.1 ± 13.8	60.2 ± 14.5	62.8 ± 13.6*	65.0 ± 16.9*	<0.0001
of which refined grains	52.9 ± 16.2	55.7 ± 17.4	56.9 ± 17.0 *	59.3 ± 21.1	<0.05
of which whole grains	4.26 ± 7.72	4.51 ± 8.4	5.82 ± 9.75	5.73 ± 11.2 *	<0.0001
Vegetables	10.9 ± 7.31	12.3 ± 9.64*	12.3 ± 7.88*	11.2 ± 8.02	<0.05
Potatoes	8.92 ± 8.97	7.09 ± 7.50*	6.24 ± 5.90*	4.9 ± 5.55*	<0.0001
Fruits	6.36 ± 5.99	6.24 ± 5.56	5.51 ± 4.18*	4.01 ± 3.4*	<0.0001
Nuts and seeds	2.73 ± 4.61	2.91 ± 5.81	2.92 ± 4.78	4.13 ± 8.86*	<0.01
Legumes	2.58 ± 6.73	2.36 ± 6.63	2.54 ± 5.21	4.06 ± 8.81*	<0.0001
Other plant foods (spices, beverages)	11.4 ± 7.08	8.98 ± 6.82*	7.80 ± 5.58*	6.72 ± 6.34*	<0.0001

[1] Data were collected by three 24h recalls.
[2] *P* values are *P*-trends for linear models adjusted for sex. NS, *P* ≥0.05
[3] Values are means ± SDs weighted for the survey design. * means significantly different from the mean of the first quartile
[4] Energy-adjusted using the residual method (%plant protein was calculated with plant and animal protein not adjusted)
div, diversity; INCA3, Individual and National Study on Food Consumption Survey 3; Q, quartile

The evenness scores for total diversity (BI-Energy) and plant protein diversity (BI-PBF) were lower under a higher intake of plant protein, whereas plant protein diversity based on count (Ratio-PPF/PF) was higher. There was no association between plant protein and total protein intakes, because plant protein was inversely associated with animal protein intake and with all animal-based food families, except 'Poultry', 'Fish' and 'Yogurt'. The protein intake from all

plant-based food families was higher under a higher intake of plant protein except ‘Potatoes’ (Table 2).

The contribution of the ‘Grains’ family to plant protein intake was significantly higher under a higher intake of plant protein (65% of plant protein intake in the fourth quartile versus 57% in the first quartile). The contributions of ‘Nuts and seeds’ (+1.4 points) and ‘Legumes’ (+1.5 points) families were also higher while those of ‘Fruits’ (-2.4 points) and ‘Potatoes’ (-4.0 points) families were lower in the fourth vs the first quartile of plant protein intake (Table 2). Socio-demographic differences were observed across plant protein intake quartiles (Supplemental Table 9).

Modelled substitutions of animal-protein foods using different level of diversity in plant-protein foods

Modelled substitutions of plant-protein foods (PPF) for animal-protein foods (APF) according to the graded contributions of the different average PPF used for substitution are shown in **Figure 1**. Because mixed foods (comprising both animal and plant protein) were not concerned by the modelled substitution, the complete substitution of APF resulted in plant protein accounting for 78% of total protein intake, rather than 100%. Following results focuses on substitutions of 50% and 100% of APF (corresponding respectively to 51% and 78% of plant protein in total protein intake) with the ‘Initial food pattern’ and the ‘100% diversified plant protein mix’ models.

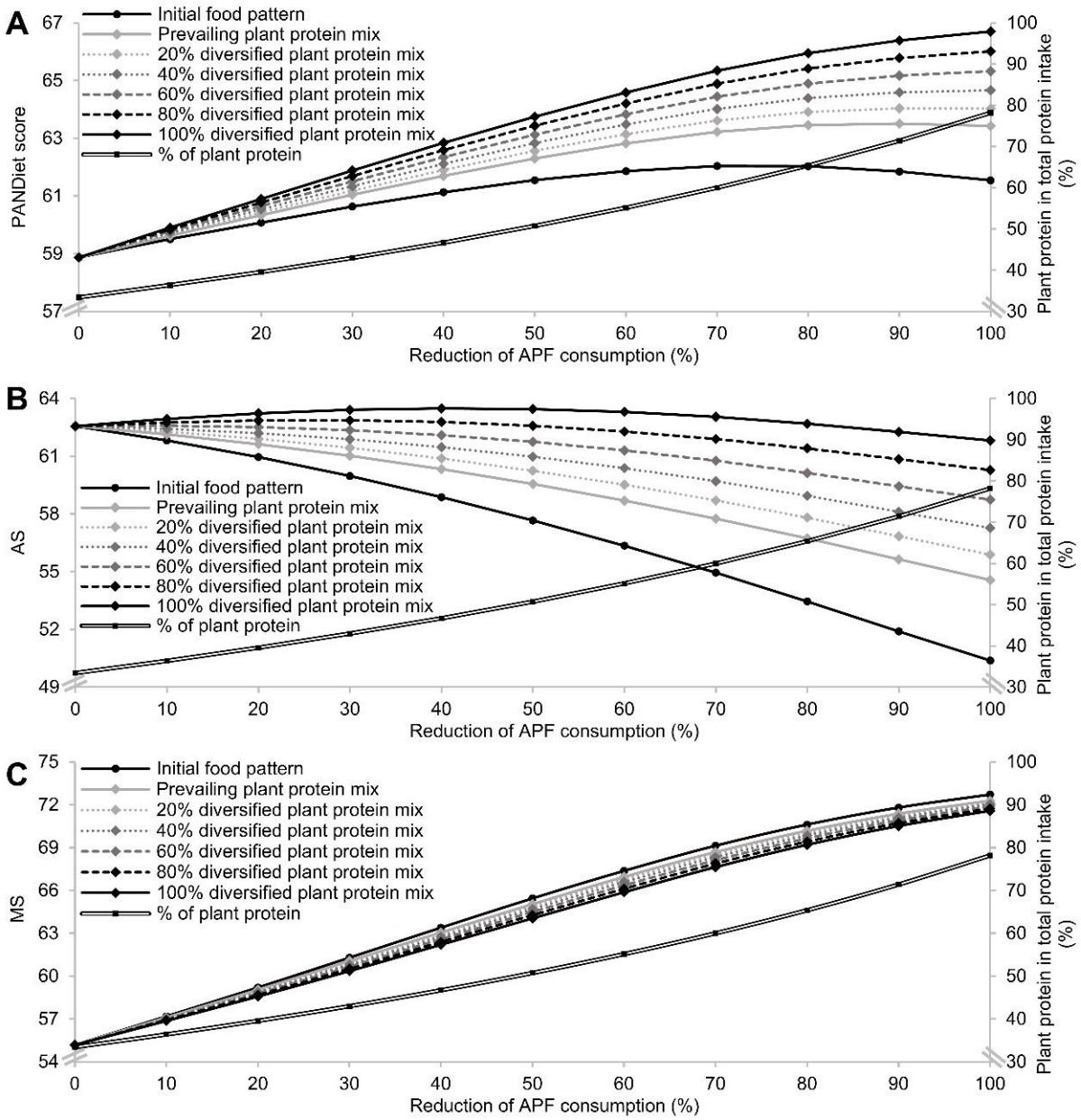


Figure 1. Changes to A. PANDiet score, B. Adequacy Sub-score and C. Moderation Sub-score (C) when replacing animal-protein foods with plant-protein foods, according to different substitution models, in the INCA3 population (n=1341). 'Initial food pattern' corresponded to the model where animal-protein foods were replaced by plant-protein foods as found in the background diet of each individual. Other models corresponded to substitution with an average virtual mix of average plant-protein foods. In the 'Prevailing plant protein mix', food items ('Refined grains', 'Whole grains', 'Legumes', 'Potatoes' 'Vegetables' and 'Nuts and seeds') were combined according to their natural average contribution to plant protein intake in the general population. The mix was then gradually diversified by decreasing the contribution of 'Refined grains', thus increasing the contribution of other food items, leading to five plant protein mixes of graded diversity ('x% diversified plant protein mix'). The percentage refers the decrease of the contribution of 'Refined grains' compared with its contribution to the 'Prevailing plant protein mix'. Data are means for the overall population in different modelled diets. Within-subject variability is not shown for the sake of clarity.

Energy-adjusted replacements of APF with PPF as they are currently consumed in the general population ('Initial food pattern') led to a reduction in nutrient adequacy, measured by the adequacy sub-score of the PANDiet (-4.9 points for AS at 50% substitution, -12.2 points for AS at 100% substitution). However, when replacements were made with the '100% diversified plant protein mix' model, AS increased at 50% substitution (+0.9 points) and were not significantly different from baseline intake at 100% substitution (Supplemental Tables 10 and 11).

MS increased when APF were replaced with PPF (up to 19% at 50% substitution and up to 32% at 100% substitution), and this was little influenced by the type of PPF used. Finally, PANDiet score increased when APF were replaced with PPF, and the increase was more marked when the mix of PPF used for substitution was more diversified (+5% and +4% at 50% and 100% for the 'Initial food pattern', respectively, and +8% and +13% at 50% and 100% for the '100% diversified plant protein mix', respectively) (Supplemental Tables 10 and 11).

The probabilities of adequacy that compose the AS changed significantly when replacing animal-protein foods with plant-protein foods (**Figure 2**). Reductions in the probability of adequacy were seen for DHA and EPA, vitamin B-12, iodine and zinc, regardless of the substitution model. The probability of adequacy for protein, total fat, riboflavin, niacin, calcium and iron also decreased but replacements with more diverse plant-protein foods limited this reduction. When '100% diversified plant protein mix' model was used, probability of adequacy for LA, ALA, fiber, vitamins B-6, C, E, folate, magnesium and potassium increased compared to baseline intake (Supplemental Tables 10 and 11).

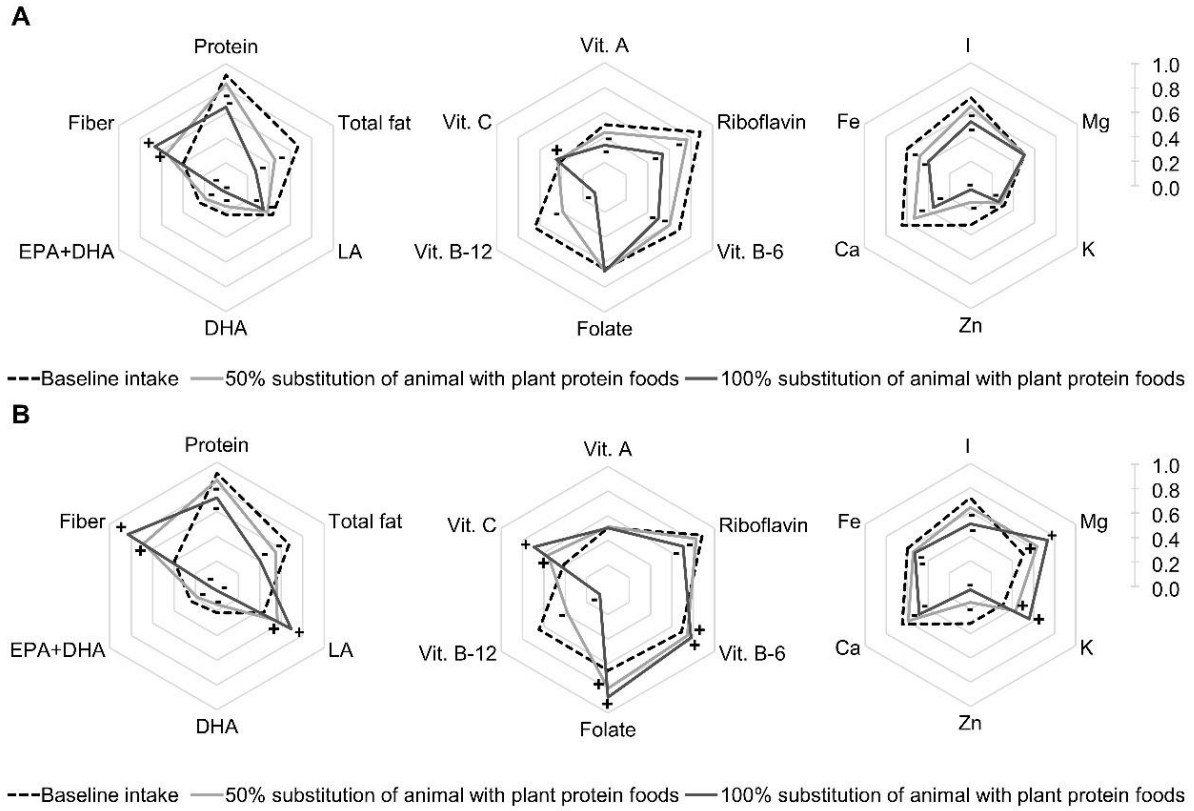


Figure 2. Means of probabilities of adequacy of nutrient intakes according to a model of replacing animal-protein foods with A. Plant-protein foods already consumed by individuals ('Initial food pattern') and B. According to a model involving substitution with a fully diversified

mix of average plant-protein foods ('100% diversified plant protein mix'), at different levels of substitution of animal-protein foods (baseline intake, 50% substitution and 100% substitution). + (-) means significantly superior (inferior) to the mean at the baseline intake. Within-subject variability is not shown for the sake of clarity. ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; Vit, vitamin.

Compared to the initial intake (83.5 ± 19.2 g/d), total protein intake was lower when replacing APF with PPF (69-71 g/d with a 50% substitution and 55-58 g/d with a 100% substitution of animal protein foods). At 100% of substitution, contributions of plant sources to plant protein intake significantly differ from baseline intake. Respectively for 'Initial food pattern' and '100% diversified plant protein mix' models, 'Refined grains' contributed to 61% and 35% (vs 56% at baseline), 'Whole grains' to 5.9% and 11% (vs 5.1% at baseline), 'Vegetables' to 11% and 17% (vs 12% at baseline), 'Potatoes' to 5.6% and 12% (vs 6.8% at baseline), 'Nuts and seeds' to 8.5% and 3.4% (vs 3.2% at baseline), 'Legumes' to 3.7% and 8.2% (vs 2.9% at baseline) (Supplemental Tables 12 and 13).

Discussion

We were able to show in this study that higher plant protein intakes favored overall diet quality, mainly by lowering the probabilities of an excessive intake of some nutrients. Surprisingly, plant protein intake was not associated with AS in observed diets. Contrary to total diversity and protein diversity, plant protein diversity was positively associated with overall diet quality. However, plant protein intake and plant protein diversity were inversely related, suggesting that a higher plant protein intake does not involve the utilization of plant foods that would otherwise be little consumed. Finally, and this was the major finding of this study, we were able to reveal that when replacing animal-protein foods with plant-protein foods it was necessary to ensure a much diversified plant protein food pattern in order to maintain or improve the overall adequacy of indispensable nutrients intakes.

Nutrient adequacy and different dimensions of total and protein diversity

Based on data in the literature (35), we were able to construct a series of scores that could capture several dimensions of diversity and be applied to assessing total, protein and plant protein diversity. Except for dissimilarity scores, we found that total and protein diversity scores were positively associated with AS and inversely with MS, resulting in a weak or no association with the PANDiet. Dissimilarity scores were positively associated with the PANDiet. Scores based on counts and evenness reflect overall diversity and are not directly related to diet quality because they consider the contributions of healthy and unhealthy foods in the same way (35). Dissimilarity scores take account of the intrinsic nutrient composition of food items, and our results showed that eating nutritionally contrasted food items was more positively associated with overall diet quality than eating numerous food items from different subgroups.

We found that diversity at the plant protein level was positively associated with the PANDiet score, and people with higher PANDiet scores consumed more plant protein, intake of which was more evenly distributed across plant-based food families. Therefore, diversifying plant protein intake appears to be favorable to nutrient adequacy and seems to occur when more whole grains, legumes, nuts and vegetables are consumed. This is in line with many current or prospective dietary guidelines (1,11,21).

Inverse association between plant protein intake and diversity

We found no association between plant protein intake and protein diversity and an inverse association with total diversity based on count and evenness. Taken together, these results indicate that a higher intake of plant protein seems to be at the expense of consuming animal protein food groups that make an important contribution to energy intake.

It may appear counterintuitive that a higher plant protein intake did not result in higher plant protein food diversity (defined as evenness). Indeed, the intake of different plant-based food groups was less evenly distributed when the plant protein intake was higher and we found that 80% of the increase in plant protein intake across different quartiles could be explained by an increase of protein from grains. It is reasonable to expect that when reducing animal protein intake, most people might consume larger quantities of plant protein sources they are more used to eating for cultural and practical reasons, and be less inclined to try new sources of plant protein, although this may also depend on the market availability of new food products (38). However, consumers adhering to plant-based diet are more likely to consume new foods and diversify their plant protein sources compared to regular meat-eaters (39,40).

Our findings might have been different in other countries where plant protein practices are not the same. For instance, according to the EPIC study, the contribution of legumes was lower in French women (2-3%, in line with our present findings) than in Greece (7-8%) and Spain (6-16%) (6). If we assume that current or future increases in plant protein intake will be dependent on initial patterns of intake, we could expect that relative increases in legume consumption would be greater in countries where they are consumed more at baseline. However, grain products continue to dominate in the plant protein intake of all western countries (40-69%) (6), so our finding should be largely generalizable. Further studies could interestingly investigate the extent to which transitions to more plant-based diets are dependent on initial consumption patterns.

It appears that higher plant protein intakes are associated with a lower animal protein intake but also with a different pattern of intake, which is closer to dietary guideline (11) since we found lower protein intakes from all animal-based food groups except for ‘Poultry’, ‘Fish’ and ‘Yogurt’. Nutrient adequacy is usually higher with diets where more of the animal protein intake is contributed by fish and yogurts and less by processed meat and cheese (34), and cardio metabolic risk is generally not increased when animal products are consumed within a healthy dietary pattern (41). In a recent study, we saw increases in lean poultry, fatty fish and yogurt when modelling optimum stepwise changes to protein intake (42).

Plant protein diversity is critical to nutrient adequacy when increasing plant protein intake

Higher PANDiet scores with a higher plant protein intake could therefore be ascribed in part to a lower intake of animal protein and a better animal protein pattern. Likewise, when replacing animal-protein foods with plant-protein foods the PANDiet score always rose because of a significant increase in MS scores that were almost not influenced by the type of plant-protein foods used for substitution, and could therefore be ascribed mostly to the reduction in animal-protein foods consumption.

In the population studied, a higher plant protein intake was not associated with higher AS scores, unlike the values obtained during a previous study (43). Further, we were able to show that AS did decrease when animal-protein foods were replaced by plant-protein foods. Foods

containing animal proteins also supply indispensable nutrients (such as calcium, iron, zinc, vitamins B-12 and D) (44) that favor nutrient adequacy (i.e. the AS score), and a reduction in animal protein intake will lead to a lower intake of these nutrients. Plant-protein foods consumed in larger quantities according to the prevailing pattern would poorly compensate for reduction in animal-protein foods in this context, since plant protein intake is dominated by refined grains. Although grains make an appreciable contribution to indispensable nutrients in western diets overall (45), refined grains are relatively low in vitamins and minerals when compared to certain animal protein foods. By contrast, when using much more diversified plant-protein foods, the replacement of animal-protein foods resulted in the same or higher overall nutrient adequacy.

In more detail, these variations in the AS score hid some highly heterogeneous modifications to the probabilities of adequacy by nutrient type. For some nutrients, replacing animal-protein foods with plant-protein foods was beneficial to adequacy because higher amounts of these nutrients are found in plant-protein foods than in animal-protein foods (44). For other nutrients, reducing the intake of animal-protein foods led to lower probabilities of adequacy, but this decrease could be partly compensated for by using a more diversified mix of plant-protein foods. Conversely, the probability of adequacy was always markedly reduced for some nutrients (EPA, DHA, vitamin B-12 and zinc) when animal-protein foods were replaced, as was expected given the importance of animal-protein foods regarding the status of these nutrients (44,46).

Limitations of the study

This study used observational data that were collected on three non-consecutive days, and this may not have clearly reflected the entire food consumption of individuals. However, our study focused on protein intake, which generally provides an overall structure for the diet, so that protein intakes could be considered reliable with a low level of classification errors. Although the present data are very recent (from the latest national representative survey in 2014-2015) they may still not be sufficiently recent to have captured the food transition that is apparently under way at present (47). Further, diversity is a broad concept with multiple complex dimensions and there is no general consensus about how best to appreciate dietary diversity. We chose to assess the different dimensions of diversity using the most recent developments in the field and focused in greater depth on protein and more specifically plant protein diversity, because protein patterns are important characteristics of the diet and protein sources are central to this current food transition. Lastly, the modelled transition from animal to plant-based proteins was performed by replacing animal-protein foods entirely by plant-protein foods, without taking account of any possible concomitant or dependent rearrangements of animal protein intake affecting these changes to meal structure and other practical factors influencing food intake. In this respect, the simulated diets may not be totally realistic, particularly at a high level of substitution. Nevertheless, we believe that these series of modelled transitions offered useful insights into the importance of plant protein diversity to the nutritional adequacy of diets.

Conclusion

In line with recent studies, our data have provided little evidence for any benefits of overall dietary diversity to diet quality, which calls to prioritize diet quality instead of promoting dietary diversity in general. The type of food groups that should be diversified is probably crucial and our data may have identified that plant protein diversity, rather than total protein diversity, is

positively associated with nutritional quality. In the context of ongoing or forecasted increases in plant protein intake designed to rebalance the animal/plant protein ratio in western diets, we also found that the potential benefit to nutrient adequacy of increasing plant protein intake is limited by the poor diversity of plant protein intake seen at present, this being dominated by refined grains. A more diverse plant protein intake, with higher contributions from legumes, nuts, seeds and vegetables appears to be critical in the context of increasing plant protein intake.

Acknowledgments

M.S., F.M. and J.-F.H. designed the study; A.D., C.D. and J.-L.V. provided the databases essential for the research; E.G. and H.F. provided methodological support; M.S. analyzed the data, performed the statistical analysis and wrote the first draft of the manuscript; M.S., F.M. and J-F.H interpreted the results; F.M. contributed to writing the manuscript; all authors provided critical comments on the manuscript. M.S. and F.M. had primary responsibility for the final content and all authors read and approved the final manuscript.

References

1. Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F, Wood A, et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet. 2019;393:447–92.

2. Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, Wiebe K, Bodirsky BL, Lassaletta L, de Vries W, Vermeulen SJ, Herrero M, Carlson KM, et al. Options for keeping the food system within environmental limits. Nature. 2018;562:519–25.

3. Hedenus F, Wirsenius S, Johansson DJA. The importance of reduced meat and dairy consumption for meeting stringent climate change targets. Climatic Change. 2014;124:79–91.

4. Gerber PJ, Food and Agriculture Organization of the United Nations, editors. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013. 115 p.

5. Wu G, Fanzo J, Miller DD, Pingali P, Post M, Steiner JL, Thalacker-Mercer AE. Production and supply of high-quality food protein for human consumption: sustainability, challenges, and innovations: Sustainability, challenge and innovations. Annals of the New York Academy of Sciences. 2014;1321:1–19.

6. Halkjær J, Olsen A, Bjerregaard LJ, Deharveng G, Tjønneland A, Welch AA, Crowe FL, Wirfält E, Hellstrom V, Niravong M, et al. Intake of total, animal and plant proteins and their food sources in 10 countries in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition. Eur J Clin Nutr. 2009;63:S16–36.

7. de Boer J, Schösler H, Aiking H. Towards a reduced meat diet: Mindset and motivation of young vegetarians, low, medium and high meat-eaters. Appetite. 2017;113:387–97.

8. Lee L, Simpson I. Are we eating less meat? A british Social Attitudes report. [Internet]. NatCen Social Research; 2016 p. 33. Available from: http://natcen.ac.uk/media/1116002/vegetarian-society-bsa-2014.pdf

9. Dagevos H. Flexibility in the Frequency of Meat Consumption - Empirical Evidence from The Netherlands. EuroChoices. 2014;13:40–5.

10. Tavoularis G, Sauvage E. Consommation et modes de vie. Les nouvelles générations transforment la consommation de viande [Internet]. CREDOC; 2018. Available from: https://www.credoc.fr/publications/les-nouvelles-generations-transforment-la-consommation-de-viande

11. Santé Publique France. Recommandations relatives à l'alimentation, à l'activité physique et à la sédentarité pour les adultes [Internet]. 2017 p. 62. Available from: www.santepubliquefrance.fr

12. Health Canada. Canada's dietary guidelines for health professionals and policy makers. [Internet]. 2019. Available from: http://publications.gc.ca/collections/collection_2019/sc-hc/H164-231-2019-eng.pdf

13. Kane-Diallo A, Srour B, Sellem L, Deschasaux M, Latino-Martel P, Hercberg S, Galan P, Fassier P, Guéraud F, Pierre FH, et al. Association between a pro plant-based

dietary score and cancer risk in the prospective NutriNet-santé cohort: Pro-animal/vegetable score and cancer risk. Int J Cancer. 2018;143:2168–76.

14. World Cancer Research Fund, American Institute for Cancer Research. Diet, nutrition, physical activity and cancer: a global perspective : a summary of the Third expert report. 2018.

15. Satija A, Bhupathiraju SN, Spiegelman D, Chiuve SE, Manson JE, Willett W, Rexrode KM, Rimm EB, Hu FB. Healthful and Unhealthful Plant-Based Diets and the Risk of Coronary Heart Disease in U.S. Adults. J Am Coll Cardiol. 2017;70:411–22.

16. Song M, Fung TT, Hu FB, Willett WC, Longo VD, Chan AT, Giovannucci EL. Association of Animal and Plant Protein Intake With All-Cause and Cause-Specific Mortality. JAMA Intern Med. 2016;176:1453.

17. Kim H, Caulfield LE, Rebholz CM. Healthy Plant-Based Diets Are Associated with Lower Risk of All-Cause Mortality in US Adults. The Journal of Nutrition. 2018;148:624–31.

18. Tharrey M, Mariotti F, Mashchak A, Barbillon P, Delattre M, Fraser GE. Patterns of plant and animal protein intake are strongly associated with cardiovascular mortality: the Adventist Health Study-2 cohort. Int J Epidemiol. 2018;47:1603–12.

19. Mariotti F. Animal and Plant Protein Sources and Cardiometabolic Health. Adv Nutr. 2019. In press.

20. Mariotti F. Plant Protein, Animal Protein, and Protein Quality. Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention. Elsevier; 2017. p. 621–42.

21. German Nutrition Society (DGE). 10 Guidelines of the German Nutrition Society (DGE) for a wholesome diet. [Internet]. 2017 [cited 2019 Jan 28]. Available from: https://www.dge.de/index.php?id=322

22. U.S Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture. 2015-2020 Dietary Guidelines for Americans. 8th Edition [Internet]. 2015 Dec. Available from: http://health.gov/dietaryguidelines/2015/guidelines/

23. Raynor HA, Epstein LH. Dietary variety, energy regulation, and obesity. Psychol Bull. 2001;127:325–41.

24. Lyles TE, Desmond R, Faulk LE, Henson S, Hubbert K, Heimburger DC, Ard JD. Diet variety based on macronutrient intake and its relationship with body mass index. MedGenMed. 2006;8:39.

25. Drescher LS, Thiele S, Mensink GBM. A new index to measure healthy food diversity better reflects a healthy diet than traditional measures. J Nutr. 2007;137:647–51.

26. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (ANSES). Opinion of the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety on “the Third Individual and National Survey on Food Consumption (INCA3 survey)” [Internet]. 2017. Available from: https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2014SA0234EN.pdf

27. Dubuisson C, Dufour A, Carrillo S, Drouillet-Pinard P, Havard S, Volatier J-L. The Third French Individual and National Food Consumption (INCA3) Survey 2014–2015:

method, design and participation rate in the framework of a European harmonization process. Public Health Nutrition. 2019;22:584–600.

28. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA3) [Internet]. 2017 Jun. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf

29. Henry C. Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. Public Health Nutrition [Internet]. 2005 [cited 2018 Dec 18];8. Available from: http://www.journals.cambridge.org/abstract_S1368980005001394

30. Black A. Critical evaluation of energy intake using the Goldberg cut-off for energy intake:basal metabolic rate. A practical guide to its calculation, use and limitations. Int J Obes. 2000;24:1119–30.

31. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles [Internet]. 2016 Dec. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf

32. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. Nutrients. 2018;10:226.

33. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, Paineau D, Huneau J-F. Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. Cameron DW, editor. PLOS ONE. 2012;7:e42155.

34. Camilleri GM, Verger EO, Huneau J-F, Carpentier F, Dubuisson C, Mariotti F. Plant and Animal Protein Intakes Are Differently Associated with Nutrient Adequacy of the Diet of French Adults. J Nutr. 2013;143:1466–73.

35. de Oliveira Otto MC, Padhye NS, Bertoni AG, Jacobs DR, Mozaffarian D. Everything in Moderation - Dietary Diversity and Quality, Central Obesity and Risk of Diabetes. Portero-Otin M, editor. PLOS ONE. 2015;10:e0141341.

36. Katanoda K, Kim H-S, Matsumura Y. New Quantitative Index for Dietary Diversity (QUANTIDD) and its annual changes in the Japanese. Nutrition. 2006;22:283–7.

37. Thiébaut A, Kesse E, Com-Nougué C, Clavel-Chapelon F, Bénichou J. Ajustement sur l’apport énergétique dans l’évaluation des facteurs de risque alimentaires. Revue d’Épidémiologie et de Santé Publique. 2004;52:539–57.

38. Schösler H, Boer J de, Boersema JJ. Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution. Appetite. 2012;58:39–47.

39. Bradbury KE, Tong TYN, Key TJ. Dietary Intake of High-Protein Foods and Other Major Foods in Meat-Eaters, Poultry-Eaters, Fish-Eaters, Vegetarians, and Vegans in UK Biobank. Nutrients. 2017;9:1317.

40. Papier K, Tong TY, Appleby PN, Bradbury KE, Fensom GK, Knuppel A, Perez-Cornago A, Schmidt JA, Travis RC, Key TJ. Comparison of Major Protein-Source Foods and Other Food Groups in Meat-Eaters and Non-Meat-Eaters in the EPIC-Oxford Cohort. Nutrients. 2019;11:824.

41. Petersen KS, Flock MR, Richter CK, Mukherjea R, Slavin JL, Kris-Etherton PM. Healthy Dietary Patterns for Preventing Cardiometabolic Disease: The Role of Plant-Based Foods and Animal Products. Curr Dev Nutr. 2017;1:cdn.117.001289.

42. de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F. The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. J Nutr. 2019;149:488–96.

43. Bianchi CM, Egnell M, Huneau J-F, Mariotti F. Plant Protein Intake and Dietary Diversity Are Independently Associated with Nutrient Adequacy in French Adults. J Nutr. 2016;146:2351–60.

44. Phillips SM, Fulgoni VL, Heaney RP, Nicklas TA, Slavin JL, Weaver CM. Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. Am J Clin Nutr. 2015;101:1346S-1352S.

45. Papanikolaou Y, Fulgoni V. Grain Foods Are Contributors of Nutrient Density for American Adults and Help Close Nutrient Recommendation Gaps: Data from the National Health and Nutrition Examination Survey, 2009–2012. Nutrients. 2017;9:873.

46. Allès B, Baudry J, Méjean C, Touvier M, Péneau S, Hercberg S, Kesse-Guyot E. Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Santé Study. Nutrients. 2017;9:1023.

47. Kantar WorldPanel. Le Flexitarisme: les Français et la consommation de produits d'origine animale [Internet]. 2017 [cited 2019 Feb 13]. Available from: http://www.lafranceagricole.fr/r/Publie/FA/p1/Infographies/Web/2017-12-01/KWP%20pour%20MeatLab%20Charal%20-%20Viande%20Les%20franc%CC%A7ais%20et%20les%20prote%CC%81ines%20animales%20(2).pdf

Supplemental Method 1. Construction of diversity scores

Dietary diversity was assessed according to different dimensions: count, evenness of food intake distribution and dissimilarity of the food items consumed.

The count represents the number of food items or food groups consumed by an individual as found in the food records. In our study, count was used to assess diversity at three different levels: the first refers to total diversity and was measured by counting the number of sub-groups consumed at least once during the three days of records (Div-Tot). This dimension is also often referred to as 'variety'. The second refers to protein diversity and is defined as the number of protein food groups consumed at least once during the three days of records (Div-Prot). The third level concerned plant protein. For this score, we counted the number of plant-protein foods (PPF) consumed, and divided it by the number of total protein foods (PF) consumed. In this way, we obtained a ratio between the protein foods consumed that were exclusively composed of plant protein and all the protein foods consumed (PPF:PF).

The evenness of the distribution of food (or protein) intake was estimated using the Berry-Index (BI), defined as $1 - \sum_{i=0}^{n} {s_i}^2$, where s_i is the share ($s_i \in [0,1]$) of food group i in the total amount of energy (or protein) intake and n is the total number of food groups (1–3). As for count, evenness was measured to account for diversity at three levels (total, protein and plant protein). For total diversity, we calculated the evenness of energy intake between food sub-groups (BI-Energy). For protein diversity, we calculated the evenness of protein intake between protein food groups (BI-Protein). For plant-protein diversity, we calculated the distribution of plant-based families (PBF) in the plant-protein intake (BI-PBF). The share of each family in the plant-protein intake was estimated after breaking down food items into ingredients using their recipes.

Dissimilarity was estimated using the Jaccard distance (JD). It was calculated by estimating the number of attributes in common between two food items x and y and unique to each food item, as follows: $JD_{xy} = \frac{B_x + C_y}{A_{xy} + B_x + C_y}$, where A_{xy} is the number of attributes shared by x and y; B_x is the number of attributes unique to x; C_y is the number of attributes unique to y. For each participant, JD was calculated for all pairwise comparisons between food items. To define attributes, we selected nutrients in order to assess dissimilarities between foods having different nutrient compositions. We considered that a food item had the attribute corresponding to a nutrient if the content in this nutrient was superior to the median composition of this nutrient for all food items consumed by all participants. The median of a nutrient differed for each score for which JD values were calculated, because the sets of food items differed. We considered food items that contributed to >1% total energy intake, to avoid those making a negligible contribution. The JD for a participant corresponded to the average distance of all Jaccard distances between all foods consumed by that participant. Three Jaccard distances were calculated: the JD for all foods consumed by participants (JD-Tot) to reflect total diversity; the JD for all protein foods consumed by participants (JD-PF) to reflect protein diversity and the JD for all plant-protein foods (PPF) to indicate plant-protein diversity.

Supplemental Table 3 provides a summary of the scores developed to assess dietary diversity.

Supplemental Table 1. Food subgroups based on INCA3 database food groups (4). "Protein food groups" were obtained according to the definition described by De Gavelle et al. (5).

Protein food groups	Foods items (of which protein foods)	Non protein food sub-groups	Foods items
Animal protein food groups:		Alcoholic beverages, beers and ciders	10
Cottage cheese	11 (11)	Alcoholic beverages, cocktails	20
Cream cheese	14 (8)	Alcoholic beverages, wine	10
Dairy desserts and similar	31 (12)	Animal fats and oils	21
Eggs and egg products	19 (18)	Breakfast cereals	31
Fish, fatty	34 (31)	Broth and stock cubes	4
Fish, lean	60 (60)	Cakes	67
Meat, beef	28 (28)	Cereal bars	6
Meat, ham and sliced meat	22 (21)	Cheese-based composite dishes	2
Meat, pork	15 (15)	Cocoa, chocolate and chocolate products	28
Meat, poultry	28 (27)	Coffee, cocoa, tea and herbal drinks	21
Meat, Veal, lamb, rabbit, horse	39 (39)	Condiment (olive, mayonnaise, hummus)	26
Milk	20 (15)	Confectionery excluding chocolate	20
Pâtés, rillettes and foie gras	23 (18)	Cooked sauces (e.g. wine sauce, cheese sauce, butter sauce)	48
Ripened cheese	90 (86)	Donuts, pancakes and waffles	15
Sausages	29 (29)	Dried fruits, chestnuts	10
Shellfish and mollusks	21 (18)	Fajitas, burritos, salty pancakes	2
Yogurts and similar	28 (17)	Fish eggs	5
		Fresh fruits	59
Plant protein food groups:		Fruit products, processed	9
Bulgur, quinoa and other grains	14 (7)	Fruit juices and nectars	31
Legumes	16 (14)	Herbs and spices	50
Nuts and oilseeds	27 (12)	Ice cream	6
Pasta (refined and wholegrain)	7 (5)	Ice cream desserts	9
Refined bread	22 (19)	Jam, marmalade, honey	9
Wholegrain bread and crisp bread	6 (4)	Meat, game	5
		Meat, offal	22
Mixed protein food groups:		Pastries	21
Cereals or legumes-based composite dishes	24 (23)	Plant-based substitutes	10
Meat-based composite dishes	30 (29)	Ready-to-cook pastry dough	5
Pizzas	14 (14)	Refined crisp bread	16
Potato-based composite dishes	13 (5)	Rice (refined and whole)	5
Quiches and salty pies	12 (8)	Salty pastries, including samosas and spring rolls	15
Sandwiches, hamburgers	2 (2)	Salty snacks (including chips)	18
Seafood or fish-based composite dishes	23 (21)	Sorbets	2
Vegetable soups	39 (20)	Starchy roots and tubers	17
Vegetable-based composite dishes	13 (10)	Sugars	18
		Sweet biscuits	46
		Vegetable fats and oils	29
		Vegetables	154
		Water, mineral	45
		Water, tap	1
		Water-based beverages (including soft drinks)	47

Supplemental Table 2. The PANDiet score, expressed as the average of an adequacy sub-score (AS) and a moderation sub-score (MS). DHA and EPA + DHA are weighted by 1⁄2 as DHA is counted twice. Niacin equivalents were calculated as the sum of dietary niacin and 1/60 dietary tryptophan. The upper reference value for sugars excludes lactose. The tolerable upper intake limit for vitamin A concerns retinol only. The PANDiet 3.0 version is based on the dietary reference intake from the 2016 Anses opinion (6) and the complete construction of the score is described elsewhere (5,7).

PANDiet score Average of Adequacy and Moderation subscores					
Adequacy subscore (AS)			**Moderation subscore (MS)**		
Nutrient	**Reference value (/day)**	**Variability**	**Nutrient**	**Reference value (/day)**	**Variability**
Protein	0.66 g/kg b.w	12.5%	Protein	2.2 g/kg b.w	12.5%
Total fat	30% EIEA	15%	Total fat	40% EIEA	15%
LA	3.08% EIEA	15%	SFA	12% EIEA	15%
ALA	0.769% EIEA	15%	Cholesterol	300 mg	15%
DHA	0.192 g	15%	Sugars	100 g	15%
EPA + DHA	0.385 g	15%	Sodium	3312 or 2483 mg	30%
Fibre	23 g	15%			
Vitamin A	570 or 490 µg	15%	**Tolerable upper intake limits**		
Thiamin	0.3mg/1000kcal	20%	Vitamin A	3000 µg	
Riboflavin	0.55mg/1000kcal	15%	Niacin	900 mg	
Niacin	5.44 mg NE/1000kcal	10%	Vitamin B-6	25 mg	
Panthotenic acid	3.62 or 2.94 mg	30%	Folate	1170 µg	
Vitamin B-6	1.5 or 1.3 mg	10%	Vitamin D	100 µg	
Folate	250 µg	15%	Vitamin E	300 mg	
Vitamin B-12	3.33 µg	10%	Calcium	2500 mg	
Vitamin C	90 mg	10%	Copper	10 mg	
Vitamin D	10 µg	25%	Iodine	600 µg	
Vitamin E	5.8 or 5.5 mg	40%	Dissociable magnesium	250 mg	
Calcium	860 (≤24y.o) or 750 (>24y.o)	15% or 13%	Selenium	300 µg	
Copper	1.0 or 0.8 mg	15%	Zinc	25 mg	
Iodine	107 µg	20%			
Bioavailable iron	0.95 mg	40%			
Magnesium	5 mg/kg bw	15%			
Manganese	1.56 or 1.39 mg	40%			
Phosphorus	Calcium (mol)/1.65	7.5% + CV Calcium (mg)			
Potassium	Sodium (mol)/1.3	15% + CV Sodium (mg)			
Selenium	54 µg	15%			
Bioavailable zinc	0.642 + 0.038*b.w mg	15%			

ALA, alpha-linolenic acid; b.w, body weight; CV, coefficient of variation; DHA, docosahexaenoic acid; EIEA, energy intake excluding alcohol; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; NE, niacin equivalent; SFA, saturated fatty acids.

Supplemental Table 3. Diversity scores used to describe three dimensions of diversity (count, evenness, dissimilarity) at three different dietary levels (total diversity, protein diversity and plant-protein diversity).

	Dietary level of diversity		
Dimension	Total diversity	Protein diversity	Plant-protein diversity
Count	Number of food sub-groups from which at least one food item was consumed. (Div-Tot)	Number of protein food groups from which at least one food item was consumed. (Div-Prot)	Number of plant protein food items consumed/Number of protein food items consumed (PPF:PF)
Evenness	Evenness of energy intake between the food sub-groups consumed. (BI-Energy)	Evenness of protein intake between the protein food groups consumed. (BI-Prot)	Evenness of plant protein intake between plant-based families, after recipe breakdown. (BI-PBF)
Dissimilarity	Dissimilarity between all food items consumed*. (JD-Tot)	Dissimilarity between all protein food items consumed*. (JD-PF)	Dissimilarity between all plant protein food items consumed*. (JD-PPF)

**contributed to >1% total energy intake.*
BI, Berry-Index; Div, diversity; JD, Jaccard distance; PBF, plant-based family; PF, protein foods; PPF, plant-protein foods.

Supplemental Table 4. Plant-protein foods (PPF) used to create a mean PPF for each plant-based family. Nutritional composition of the mean food item was defined as the mean of the nutritional composition of the PPF included in the respective plant-based family.

Refined grains mean PPF	Wholegrain mean PPF
Bread (average) Bread, French bread, baguette Bread, French bread (baguette or ball), with yeast Toasted bread, home-made Bread, French bread, baguette, unsalted Brown bread, French bread (baguette or ball), with flour type 80 or 110 Country-style bread, French bread (baguette or ball) Bread, French bread, without salt Pita bread English muffin, prepacked Bread, home-made, with flour for home-made bread preparation Country-style bread, home-made (with flour for bread making machine) Rusk Asian noodles, flavored, cooked Wheat flour, type 55 (for pastry) Couscous (durum wheat semolina pre-cooked with steam), cooked, unsalted Dried pasta, cooked, unsalted Breakfast cereals, diet, plain or with honey, fortified with vitamins and chemical elements	Bread, whole meal or integral bread (made with flour type 150) English muffin, whole-wheat flour, prepacked Rusk, whole meal or rich in fiber Wheat Swedish toast, whole meal Durum wheat pre-cooked, whole grain, cooked, unsalted Durum wheat, pre-cooked, cooked, in a microwaveable bag Oatmeal flakes Quinoa, boiled/cooked in water, unsalted Buckwheat flour Oat bran Dried pasta, whole meal, cooked, unsalted Oat flakes, pre-cooked, raw
Vegetables mean PPF	**Legumes mean PPF**
Artichoke, globe, cooked Swiss chard, cooked Brussels sprout, cooked Spinach, cooked Garden peas, canned, drained Garden peas, cooked Salsify, cooked Artichoke, globe, raw Broccoli, raw Spinach, canned, drained Brussels sprout, canned, drained Tomato, green, raw Spinach, frozen, cooked Garden peas, frozen, cooked Onion, dried Tomato, dried Broccoli, frozen, cooked Brussels sprout, frozen, cooked Garden peas and carrots, frozen, cooked Chinese cabbage (nappa cabbage or bok choy), cooked Cardoon, cooked Snow pea, cooked Soup for baby, with vegetables and potatoes Vegetables (3-4 types), mashed Broccoli, puree Carrots, puree Vegetables pan-fried without mushrooms, frozen, raw Mixed vegetables for soups, frozen, raw Courgettes, puree Spring vegetables, frozen, raw (French beans, carrots, potatoes, green peas, onions) Mixed diced vegetables, frozen Grilled vegetables pan-fried, Mediterranean-style, frozen, raw Asparagus, white or purple, peeled, raw Green peas, puree Spinach, puree Mixed vegetables for couscous, cooked Vegetables pan-fried with mushrooms (country-style), frozen Vegetable, cooked (average)	Soy drink, plain Soy drink, plain, fortified with calcium Soy drink, flavored, with sugar Haricot beans with tomato sauce, canned Broad bean, cooked Haricot bean, cooked Red kidney bean, cooked Lentil, cooked Split pea, cooked Flageolet bean, canned, drained Lentil, seasoned, canned, drained Haricot bean, canned, drained Flageolet bean, cooked Red kidney bean, canned, drained Mung bean, cooked Chick pea, canned, drained Legume, cooked (average) Tofu, plain
	Potatoes mean PPF
	Potato, roasted/baked Mashed potatoes (average)
	Nuts mean PPF
	Almond, (with peel) Peanut Peanut, grilled, salted Sunflower seed Cucurbitacea, seed Sesame seed, husked Peanut, grilled Almond, peeled, unpeeled or blanched Pistachio nut, grilled Seeds, chia, dried Peanut butter or peanut paste

Supplemental Table 5. PANDiet scores and subscores, diversity scores, total energy and protein intakes (total, animal, plant and by food families) in the French adult population, in men and in women[1].

	All (*n*=1341)	**Men (*n*=564)**	**Women (*n*=777)**	***P*[2]**
PANDiet score (0-100)	58.9 ± 6.14	58.9 ± 6.56	58.8 ± 5.82	NS
Adequacy subscore (AS) (0-100)	62.6 ± 11.9	65.4 ± 12.4	59.6 ± 10.9	<0.0001
Moderation subscore (MS) (0-100)	55.2 ± 14.7	52.4 ± 16.9	58.0 ± 12.2	<0.0001
Total div. – Count *("Div-Tot")* (0-75)	25.9 ± 5.04	26.3 ± 5.61	25.5 ± 4.55	<0.01
Total div. – Evenness *("BI-Energy")* (0-1)	0.90 ± 0.05	0.90 ± 0.06	0.90 ± 0.04	NS
Total div. – Dissimilarity *("JD-Tot")* (0-1)	0.70 ± 0.05	0.71 ± 0.06	0.70 ± 0.04	<0.0001
Protein div. – Count *("Div-Prot")* (0-32)	10.1 ± 2.57	10.3 ± 2.85	9.88 ± 2.33	<0.01
Protein div. – Evenness *("BI-Prot")* (0-1)	0.81 ± 0.08	0.81 ± 0.09	0.81 ± 0.07	NS
Protein div. – Dissimilarity *("JD-PF")* (0-1)	0.69 ± 0.04	0.68 ± 0.05	0.70 ± 0.04	<0.0001
Plant protein div. – Count *("PPF:PF")* (0-1)	0.24 ± 0.10	0.24 ± 0.11	0.25 ± 0.10	NS
Plant protein div. – Evenness *("BI-PBF")* (0-1)	0.55 ± 0.14	0.53 ± 0.16	0.56 ± 0.13	<0.001
Plant protein div. – Dissimilarity *("JD-PPF")*[3] (0-1)	0.64 ± 0.14	0.64 ± 0.15	0.64 ± 0.13	NS
Total energy, *kcal/d*	2341 ± 785	2693 ± 877	1979 ± 520	<0.0001
Total protein[4], *g/d*	83.5 ± 19.2	84.7 ± 24.6	82.3 ± 13.9	<0.05
Animal protein[4], *g/d*	55.8 ± 20.1	57.2 ± 25.8	54.4 ± 14.5	<0.01
Animal protein, *% of total protein*	66.6 ± 9.76	66.5 ± 10.6	66.6 ± 9.12	NS
Protein from animal-based families[4], *g/d*				
Red meat	12.9 ± 16.2	14.0 ± 21.6	11.8 ± 10.5	<0.01
Cheeses	8.75 ± 7.02	8.73 ± 8.69	8.76 ± 5.50	NS
Poultry	7.56 ± 10.5	7.02 ± 11.9	8.12 ± 9.39	<0.05
Processed meat	6.19 ± 7.36	6.34 ± 9.69	6.03 ± 5.03	NS
Fish	6.17 ± 9.16	6.75 ± 11.6	5.58 ± 6.87	<0.05
Milk	5.86 ± 6.61	5.79 ± 7.11	5.93 ± 6.23	NS
Yogurt	3.52 ± 3.60	3.57 ± 3.88	3.48 ± 3.38	NS
Eggs	3.52 ± 3.23	3.47 ± 3.53	3.57 ± 2.99	NS
Other meats (offal, game)	0.68 ± 3.38	0.85 ± 4.51	0.51 ± 2.20	NS
Other dairy products (butter, cream)	0.63 ± 0.78	0.64 ± 0.981	0.62 ± 0.60	NS
Plant protein[4], *g/d*	27.7 ± 6.15	27.5 ± 7.34	27.8 ± 5.12	NS
Plant protein, *% of total protein*	33.4 ± 9.76	33.5 ± 10.6	33.4 ± 9.12	NS
Protein from plant-based families[4], *g/d*				
Grains	16.8 ± 6.45	16.5 ± 7.81	17.2 ± 5.23	<0.05
of which refined grains	15.1 ± 6.86	14.8 ± 8.15	15.3 ± 5.74	NS
of which whole grains	1.73 ± 2.87	1.64 ± 3.00	1.82 ± 5.74	NS
Vegetables	3.11 ± 2.14	3.11 ± 2.33	3.12 ± 1.98	NS
Potatoes	1.67 ± 2.06	1.70 ± 2.76	1.64 ± 1.35	NS
Fruits	1.48 ± 1.21	1.51 ± 1.45	1.44 ± 0.99	NS
Nuts and seeds	1.08 ± 2.04	1.02 ± 2.45	1.13 ± 1.68	NS
Legumes	0.98 ± 2.51	1.13 ± 3.23	0.83 ± 1.81	<0.05
Other plant foods (spices, beverages)	2.54 ± 2.03	2.58 ± 2.45	2,51 ± 1.65	NS

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n* =1341. Values are means ± SDs weighted for the survey design. Data were collected by three 24-h recalls. BI, Berry-Index, div, diversity; JD, Jaccard distance; NS, nonsignificant; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; PBF, plant-based family; PF, protein food; PPF, plant-protein food.

[2] *P* values are based on Student's test for comparisons between males and females. NS, $P \geq 0.05$.

[3] To calculate JD-PPF, 1181 adults were included (500 men, 681 women), discarding individuals who did not consume plant-protein food items for which a Jaccard distance could not be calculated.

[4] Energy-adjusted using the residual method (percentage of plant protein was calculated with plant and animal protein not adjusted).

Supplemental Table 6. PANDiet scores and subscores, diversity scores, total energy and protein intakes, and protein intakes from animal-based and plant-based families according to PANDiet quartiles in the French adult population[1].

	PANDiet				
	Q1 (*n*=335) 40.6 – 55.2 g/d	**Q2 (*n*=335) 55.2 – 59.2 g/d**	**Q3 (*n*=336) 59.2 – 63.3 g/d**	**Q4 (*n*=335) 63.3 – 79.9 g/d**	***P*[2]**
PANDiet score (0-100)	51.7 ± 2.92	57.2 ± 1.22*	61.1 ± 1.17*	67.0 ± 2.99*	<0.0001
Adequacy subscore (AS) (0-100)	59.2 ± 13.2	62.0 ± 12.7*	62.4 ± 11.4*	67.5 ± 8.34*	<0.0001
Moderation subscore (MS) (0-100)	44.3 ± 13.7	52.5 ± 12.7*	59.7 ± 11.5*	66.6 ± 9.52*	<0.0001
Total div. – Count *("Div-Tot") (0-75)*	26.2 ± 5.41	26.6 ± 5.01	25.4 ± 5.26	25.4 ± 4.33	NS
Total div. – Evenness *("BI-Energy") (0-1)*	0.90 ± 0.04	0.90 ± 0.09	0.89 ± 0.07	0.90 ± 0.04	NS
Total div. – Dissimilarity *("JD-Tot") (0-1)*	0.69 ± 0.05	0.69 ± 0.05*	0.71 ± 0.05*	0.72 ± 0.04*	<0.0001
Protein div. – Count *("Div-Prot") (0-32)*	9.94 ± 2.69	10.4 ± 2.58	9.80 ± 2.63	10.2 ± 2.33	NS
Protein div. – Evenness *("BI-Prot") (0-1)*	0.81 ± 0.07	0.81 ± 0.08	0.81 ± 0.08	0.82 ± 0.06	NS
Protein div. – Dissimilarity *("JD-PF") (0-1)*	0.68 ± 0.05	0.69 ± 0.04	0.69 ± 0.04*	0.70 ± 0.04*	<0.0001
Plant protein div. – Count *("Ratio-PPF/PF") (0-1)*	0.23 ± 0.10	0.24 ± 0.10	0.25 ± 0.10*	0.27 ± 0.01*	<0.0001
Plant protein div. – Evenness *("BI-PBF")* (0-1)	0.52 ± 0.14	0.55 ± 0.16*	0.54 ± 0.13	0.58 ± 0.12*	<0.0001
Plant protein div. – Dissimilarity *("JD-PPF") (0-1)*	0.61 ± 0.14	0.64 ± 0.14	0.67 ± 0.14*	0.64 ± 0.13*	<0.05
Total energy, *kcal/d*	2625 ± 1019	2311 ± 763*	2207 ± 658*	2185 ± 530*	<0.0001
Total protein[3], *g/d*	78.5 ± 21.4[2]	83.6 ± 21.4*	85.0 ± 16.9*	87.8 ± 15.0*	<0.0001
Animal protein[3], *g/d*	54.1 ± 23.2	56.2 ± 21.6	56.4 ± 18.6	56.9 ± 16.4*	<0.05
Protein from animal-based families[3], *g/d*					
Red meat	11.3 ± 16.4	13.6 ± 17.4	14.0 ± 16.6	13.1 ± 13.9	NS
Cheeses	10.4 ± 8.36	8.79 ± 7.58	8.69 ± 6.56*	6.82 ± 4.56*	<0.0001
Poultry	6.53 ± 11.5	8.28 ± 11.6*	8.17 ± 9.76*	7.28 ± 8.93*	<0.01
Processed meat	8.23 ± 9.33	5.53 ± 7.55*	5.97 ± 6.17*	4.75 ± 5.25*	<0.0001
Fish	3.54 ± 7.01	5.95 ± 9.58*	6.17 ± 8.80*	9.62 ± 9.94*	<0.0001
Milk	5.31 ± 8.15	5.61 ± 5.90	5.29 ± 4.90	7.45 ± 6.85*	<0.0001
Yogurt	2.86 ± 3.21	3.44 ± 3.41	3.73 ± 3.79*	4.2 ± 3.81*	<0.0001
Eggs	4.50 ± 3.93	3.70 ± 3.23*	3.04 ± 2.93*	2.63 ± 2.25*	<0.0001
Other meats (offal, game)	0.83 ± 4.47	0.58 ± 3.31	0.75 ± 3.27	0.56 ± 2.01	NS
Other dairy products (butter, cream)	0.68 ± 0.890	0.70 ± 0.88	0.59 ± 0.64	0.52 ± 0.67*	<0.01
Plant protein[3], *g/d*	24.5 ± 6.16	27.4 ± 5.71*	28.7 ± 5.16*	30.8 ± 5.66*	<0.0001
Protein from plant-based families[3], *g/d*					
Grains	15.3 ± 6.35	16.9 ± 7.41*	17.5 ± 5.87*	17.9 ± 5.72*	<0.0001
of which refined grains	14.0 ± 6.51	15.2 ± 7.85 *	15.7 ± 6.42 *	15.6 ± 6.43 *	<0.001
of which whole grains	1.24 ± 2.36	1.67 ± 2.64 *	1.85 ± 2.9 *	2.27 ± 3.38 *	<0.0001
Vegetables	2.33 ± 1.95	3.02 ± 2.00*	3.43 ± 2.26*	3.82 ± 2.03*	<0.0001
Potatoes	1.40 ± 2.10	1.52 ± 1.66	2.00 ± 2.54*	1.81 ± 1.79	<0.05
Fruits	1.09 ± 1.09	1.34 ± 1.08*	1.55 ± 1.22*	2.04 ± 1.21*	<0.0001
Nuts and seeds	0.96 ± 2.02	0.92 ± 2.00	1.19 ± 2.31	1.30 ± 1.80*	<0.01
Legumes	0.81 ± 2.79	1.21 ± 2.80	0.725 ± 1.95	1.21 ± 2.37*	<0.001
Other plant foods (spices, beverages)	2.59 ± 2.02	2.55 ± 2.03	2.27 ± 1.53	2.78 ± 2.40	NS
Plant protein, *% of total protein*	32.7 ± 10.3	33.0 ± 9.06	33.3 ± 9.97	35.0 ± 9.52*	<0.01
Protein from plant-based families, *% of plant protein*					
Grains	64.5 ± 13.9	61.5 ± 15.7*	60.7 ± 16.0*	57.9 ± 13.7*	<0.0001
of which refined grains	60.8 ± 16.5	56.6 ± 18.1 *	55.5 ± 18.6 *	51.1 ± 18.1 *	<0.0001
of which whole grains	3.66 ± 7.76	4.94 ± 8.99	5.20 ± 9.36 *	6.79 ± 10.9 *	<0.0001
Vegetables	9.09 ± 7.20	11.6 ± 8.45*	13.1 ± 9.20*	13.2 ± 7.41*	<0.0001
Potatoes	6.61 ± 6.88	6.84 ± 7.44	7.20 ± 8.50	6.42 ± 6.02	NS
Fruits	4.26 ± 3.89	5.14 ± 4.76*	5.89 ± 5.45*	7.06 ± 5.28*	<0.0001
Nuts and seeds	3.20 ± 6.01	2.54 ± 5.35	3.34 ± 7.62	3.78 ± 5.84	NS
Legumes	2.43 ± 6.81	3.62 ± 7.85	2.21 ± 6.46	3.4 ± 6.69*	<0.01
Other plant foods (spices, beverages)	9.97 ± 7.21	8.79 ± 6.60	7.66 ± 6.15*	8.31 ± 6.7*	<0.001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n* =1341. Values are means ± SDs weighted for the survey design. Data were collected by three 24-h recalls. *Significantly different from the mean of the first quartile. BI, Berry-Index, div, diversity; JD, Jaccard distance; NS, nonsignificant; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; PBF, plant-based family; PF, protein food; PPF, plant-protein food; Q, quartile.

[2] *P* values are *P*-trends for linear models adjusted for sex. NS, $P \geq 0.05$.

[3] Energy-adjusted using the residual method (percentage of plant protein was calculated with plant and animal protein not adjusted).

Supplemental Table 7. Socio-demographic characteristics according to PANDiet quartiles in the French adult population[1].

	PANDiet				
	Q1 (n=335) 40.6 – 55.2 g/d	**Q2 (n=335) 55.2 – 59.2 g/d**	**Q3 (n=336) 59.2 – 63.3 g/d**	**Q4 (n=335) 63.3 – 79.9 g/d**	***P*[2]**
Sex, *% men*	50.1	52.1	49.5	50.8	NS
Age group, *%*					<0.0001
18-24 y	12.8	15	13.8	7.4	
25-34 y	29.3	16.5	19.0	10.6	
35-49 y	35.9	42.1	28.6	42.0	
50-65 y	22.0	26.4	38.6	40.0	
Educational level, *%*					<0.01
Primary school	47.1	41.0	36.4	39.4	
Middle school	16.5	17.5	25.3	16.4	
Secondary school	20.4	19.2	18.7	20.1	
College or university	16.0	22.3	19.6	24.1	
Occupational status of family head, *%*					<0.001
Employee	13.2	12.6	14.0	11.3	
Manual worker	26.1	17.4	21.4	16.5	
Farmer	0.60	1.35	1.42	2.15	
Craftsman, shopkeeper, business owner	4.31	8.89	3.97	5.93	
Intermediate profession	23.7	25.0	21.9	21.4	
Professional, executive	16.7	18.2	18.0	24.4	
Retired	8.34	9.38	14.2	16.4	
Inactive	7.10	7.15	5.12	1.86	
Missing data	0.00	0.08	0.00	0.00	
Region of France, *%*					<0.0001
Ile-de-France (Paris area)	12.5	15.9	21.9	27.7	
North-West	24.3	19.0	16.8	18.0	
North-East	28.5	32.0	26.9	22.3	
South-East	19.0	14.4	16.9	16.7	
South-West	15.7	18.8	17.5	15.3	

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n*=1341. Values are percentages weighted for the survey design. NS, nonsignificant; Q, quartile; y, years old.
[2] *P* values are from χ^2 test. NS, $P \geq 0.05$.

Supplemental Table 8. PANDiet, AS, MS and probability of adequacy according to plant protein intake quartiles in the French adult population[1].

	Plant protein intake				
	Q1 (n=335) 0.00 – 24.0 g/d	**Q2 (n=335) 24.0 – 27.3 g/d**	**Q3 (n=336) 27.3 – 30.8 g/d**	**Q4 (n=335) 30.8 – 54.2 g/d**	***P*[2]**
PANDiet score (0-100)	55.8 ± 5.56	58.1 ± 5.63*	59.7 ± 5.55*	61.9 ± 5.96*	<0.0001
Adequacy subscore (AS) (0-100)	64.1 ± 12.7	60.4 ± 12.5	61.6 ± 11.1*	64.0 ± 10.9	NS
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)					
Protein	0.91 ± 0.17	0.87 ± 0.22	0.92 ± 0.16	0.94 ± 0.13*	<0.05
Total fat	0.78 ± 0.24	0.73 ± 0.23*	0.67 ± 0.24*	0.51 ± 0.30*	<0.0001
LA	0.48 ± 0.33	0.49 ± 0.33	0.42 ± 0.30*	0.37 ± 0.34*	<0.001
ALA	0.13 ± 0.22	0.11 ± 0.21	0.09 ± 0.19	0.09 ± 0.19	NS
DHA	0.26 ± 0.35	0.20 ± 0.33	0.24 ± 0.33	0.18 ± 0.31	NS
EPA+DHA	0.28 ± 0.37	0.24 ± 0.35	0.28 ± 0.34	0.19 ± 0.33	NS
Fiber	0.35 ± 0.33	0.27 ± 0.28	0.36 ± 0.30*	0.61 ± 0.32*	<0.0001
Vitamin A	0.52 ± 0.37	0.45 ± 0.37*	0.51 ± 0.34	0.53 ± 0.36	NS
Thiamine	0.95 ± 0.08	0.96 ± 0.09	0.98 ± 0.05*	0.97 ± 0.05*	<0.001
Riboflavin	0.86 ± 0.21	0.90 ± 0.18	0.91 ± 0.16	0.87 ± 0.19*	<0.05
Niacin	0.88 ± 0.20	0.90 ± 0.20	0.92 ± 0.17*	0.89 ± 0.21	NS
Pantothenic acid	0.87 ± 0.18	0.85 ± 0.19	0.87 ± 0.16	0.90 ± 0.14*	<0.05
Vitamin B-6	0.69 ± 0.32	0.65 ± 0.32	0.67 ± 0.29	0.75 ± 0.29*	<0.001
Folate	0.65 ± 0.32	0.58 ± 0.35	0.63 ± 0.31	0.76 ± 0.28*	<0.0001
Vitamin B-12	0.73 ± 0.30	0.63 ± 0.35*	0.62 ± 0.31*	0.61 ± 0.35*	<0.0001
Vitamin C	0.40 ± 0.38	0.39 ± 0.39	0.42 ± 0.37	0.45 ± 0.40*	<0.05
Vitamin D	0.04 ± 0.09	0.04 ± 0.11	0.02 ± 0.07*	0.02 ± 0.07	<0.05
Vitamin E	0.83 ± 0.22	0.80 ± 0.20	0.78 ± 0.21	0.82 ± 0.20*	NS
Iodine	0.74 ± 0.29	0.67 ± 0.30	0.69 ± 0.29	0.77 ± 0.26*	NS
Magnesium	0.50 ± 0.35	0.42 ± 0.35	0.49 ± 0.32	0.61 ± 0.35*	<0.0001
Phosphorus	0.96 ± 0.09	0.96 ± 0.09	0.98 ± 0.05*	0.98 ± 0.05*	<0.001
Potassium	0.38 ± 0.26	0.34 ± 0.23	0.28 ± 0.22*	0.26 ± 0.24*	<0.0001
Selenium	0.89 ± 0.13	0.88 ± 0.15	0.89 ± 0.12	0.92 ± 0.10*	<0.0001
Zinc	0.40 ± 0.33	0.31 ± 0.29*	0.30 ± 0.26*	0.28 ± 0.27*	<0.0001
Copper	0.91 ± 0.14	0.88 ± 0.12	0.89 ± 0.18	0.95 ± 0.13*	<0.0001
Manganese	0.89 ± 0.14	0.87 ± 0.17	0.90 ± 0.13*	0.96 ± 0.08*	<0.0001
Calcium	0.69 ± 0.32	0.60 ± 0.37	0.62 ± 0.32*	0.68 ± 0.33	NS
Iron	0.64 ± 0.28	0.58 ± 0.30	0.56 ± 0.27	0.61 ± 0.30	NS
Moderation subscore (MS) (0-100)	47.4 ± 15.2	55.7 ± 12.7*	57.7 ± 13.8*	59.8 ± 13.6*	<0.0001
Probability of adequacy for MS components (0-1)					
Protein	0.90 ± 0.19	0.96 ± 0.12*	0.94 ± 0.15*	0.91 ± 0.18	NS
Total fat	0.64 ± 0.25	0.72 ± 0.22*	0.78 ± 0.17*	0.86 ± 0.16*	<0.0001
SFA	0.21 ± 0.27	0.25 ± 0.24*	0.29 ± 0.26*	0.44 ± 0.33*	<0.0001
Cholesterol	0.45 ± 0.35	0.58 ± 0.34*	0.61 ± 0.32*	0.62 ± 0.35*	<0.0001
Sugars (without lactose)	0.48 ± 0.35	0.69 ± 0.32*	0.71 ± 0.31*	0.68 ± 0.33*	<0.0001
Sodium	0.18 ± 0.22	0.18 ± 0.20	0.13 ± 0.17*	0.09 ± 0.14*	<0.0001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, n=1341. Values are means ± SDs weighted for the survey design. Data were collected by three 24-h recalls. *Significantly different from the means of the first quartile. ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; NS, non-significant; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; Q, quartile; SFA, saturated fatty acids.
[2] *P* values are *P*-trends for linear models adjusted for sex. NS, *P* ≥0.05.

Supplemental Table 9. Socio-demographic characteristics according to plant protein intake quartiles in the French adult population[1].

	Plant protein intake				
	Q1 (n=335) 0.00 – 24.0 g/d	**Q2 (n=335) 24.0 – 27.3 g/d**	**Q3 (n=336) 27.3 – 30.8 g/d**	**Q4 (n=335) 30.8 – 54.2 g/d**	***P*[2]**
Sex, *% men*	57.9	46.1	39.7	57.8	<0.0001
Age group, *%*					<0.0001
18-24 y	18.8	10.8	7.78	12.0	
25-34 y	23.3	17.8	20.5	15.6	
35-49 y	32.1	35.4	39.1	41.8	
50-64 y	25.7	36.0	32.6	30.7	
Educational level, *%*					<0.01
Primary school	41.4	47.6	36.3	39.1	
Middle school	24.9	13.0	19.4	18.4	
Secondary school	15.5	19.2	21.8	21.9	
College or university	18.3	20.2	22.5	20.6	
Occupational status of family head, *%*					<0.0001
Employee	11.8	13.0	17.1	9.71	
Manual worker	28.2	20.0	11.7	21.5	
Farmer	1.27	0.45	2.85	0.96	
Craftsman, shopkeeper, business owner	5.87	3.80	2.90	10.2	
Intermediate profession	21.4	24.0	26.9	20.5	
Professional, executive	16.7	16.7	19.5	23.4	
Retired	7.91	14.5	14.6	10.5	
Inactive	6.78	7.52	4.37	3.20	
Missing data	0.00	0.00	0.09	0.00	
Region of France, *%*					<0.0001
Ile-de-France (Paris area)	15.5	17.5	17.7	25.3	
North-West	23.2	14.9	20.1	20.6	
North-East	33.1	32.9	23.9	20.7	
South-East	14.1	19.7	15.9	17.2	
South-West	14.2	15.0	22.4	16.3	

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n*=1341. Values are percentages weighted for the survey design. NS, nonsignificant; Q, quartile; y, years old.
[2] *P* values are from χ^2 test. NS, $P \geq 0.05$.

Supplemental Table 10. PANDiet, MS, AS and probability of adequacy for AS in the general population before the substitution of APFs ('Baseline intake') and after the modelled replacement of 50% of APFs with PPFs initially consumed by individuals ('Model 1: Initial food pattern') or with a virtual mix of mean PPFs at different levels of diversity ('Model 2: Substitution with a mix of mean PPFs of graded diversity') in the French adult population[1].

	Baseline intake	Simulation of the substitution of 50% APFs with PPFs							
		Model 1: Initial food pattern	Model 2: Substitution with a mix of mean PPFs of graded diversity[2]						
			Prevailing mix	20% diversified mix	40% diversified mix	60% diversified mix	80% diversified mix	100% diversified mix	*P*[3]
PANDiet score (0-100)	58.9 ± 6.14	61.6 ± 6.18*	62.3 ± 6.11*	62.6 ± 6.14*	62.8 ± 6.18*	63.1 ± 6.21*	63.4 ± 6.25*	63.8 ± 6.29*	<0.0001
Moderation subscore (MS) (0-100)	55.2 ± 14.7	65.4 ± 12.7*	65.0 ± 12.9*	64.9 ± 13.0*	64.7 ± 13.1*	64.5 ± 13.1*	64.3 ± 13.2*	64.1 ± 13.3*	<0.0001
Adequacy subscore (AS) (0-100)	62.6 ± 11.9	57.7 ± 12.2*	59.6 ± 12.2*	60.3 ± 12.2*	61.0 ± 12.2*	61.8 ± 12.2	62.6 ± 12.2	63.5 ± 12.1*	<0.0001
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)									
Protein	0.91 ± 0.17	0.84 ± 0.24*	0.85 ± 0.24*	0.85 ± 0.24*	0.85 ± 0.23*	0.85 ± 0.23*	0.85 ± 0.23*	0.86 ± 0.23*	<0.0001
Total fat	0.67 ± 0.27	0.46 ± 0.29*	0.46 ± 0.29*	0.48 ± 0.29*	0.49 ± 0.29*	0.51 ± 0.29*	0.53 ± 0.29*	0.55 ± 0.28*	<0.001
LA	0.44 ± 0.33	0.39 ± 0.33*	0.41 ± 0.32*	0.43 ± 0.33	0.46 ± 0.33*	0.49 ± 0.32*	0.53 ± 0.32*	0.56 ± 0.32*	<0.0001
ALA	0.11 ± 0.21	0.11 ± 0.21	0.10 ± 0.20	0.10 ± 0.20	0.11 ± 0.21	0.11 ± 0.21	0.12 ± 0.22	0.13 ± 0.22*	<0.001
DHA	0.22 ± 0.33	0.15 ± 0.28*	0.15 ± 0.28*	0.15 ± 0.28*	0.15 ± 0.28*	0.15 ± 0.28*	0.15 ± 0.28*	0.15 ± 0.28*	<0.0001
EPA+DHA	0.25 ± 0.35	0.18 ± 0.30*	0.18 ± 0.30*	0.18 ± 0.30*	0.18 ± 0.30*	0.18 ± 0.30*	0.18 ± 0.30*	0.18 ± 0.30*	<0.0001
Fiber	0.40 ± 0.34	0.55 ± 0.34*	0.58 ± 0.34*	0.60 ± 0.34*	0.62 ± 0.34*	0.64 ± 0.33*	0.66 ± 0.33*	0.69 ± 0.32*	<0.0001
Vitamin A	0.50 ± 0.36	0.44 ± 0.36*	0.45 ± 0.36*	0.46 ± 0.36*	0.47 ± 0.36*	0.49 ± 0.36	0.50 ± 0.36	0.51 ± 0.36	<0.001
Thiamine	0.96 ± 0.08	0.95 ± 0.09	0.98 ± 0.06*	0.98 ± 0.05*	0.98 ± 0.05*	0.98 ± 0.05*	0.98 ± 0.05*	0.98 ± 0.04*	<0.0001
Riboflavin	0.89 ± 0.19	0.76 ± 0.28*	0.81 ± 0.25*	0.87 ± 0.24*	0.82 ± 0.24*	0.82 ± 0.24*	0.82 ± 0.24*	0.83 ± 0.24*	NS
Niacin	0.90 ± 0.20	0.85 ± 0.25*	0.88 ± 0.21	0.89 ± 0.21	0.89 ± 0.21	0.89 ± 0.20	0.90 ± 0.20	0.90 ± 0.19	<0.0001
Pantothenic acid	0.87 ± 0.17	0.84 ± 0.19*	0.86 ± 0.18	0.87 ± 0.17	0.87 ± 0.17	0.87 ± 0.17	0.87 ± 0.17	0.87 ± 0.17	<0.05
Vitamin B-6	0.69 ± 0.31	0.60 ± 0.34*	0.67 ± 0.32	0.69 ± 0.31	0.70 ± 0.31	0.71 ± 0.30*	0.73 ± 0.29*	0.74 ± 0.29*	<0.0001
Folate	0.66 ± 0.32	0.67 ± 0.32	0.73 ± 0.30*	0.74 ± 0.29*	0.76 ± 0.29*	0.77 ± 0.28*	0.79 ± 0.27*	0.80 ± 0.26*	<0.0001
Vitamin B-12	0.65 ± 0.33	0.39 ± 0.35*	0.40 ± 0.35*	0.39 ± 0.35*	0.39 ± 0.35*	0.39 ± 0.35*	0.38 ± 0.35*	0.38 ± 0.35*	<0.0001
Vitamin C	0.41 ± 0.39	0.44 ± 0.38	0.48 ± 0.39*	0.49 ± 0.39*	0.51 ± 0.39*	0.53 ± 0.38*	0.54 ± 0.38*	0.56 ± 0.38*	<0.0001
Vitamin D	0.03 ± 0.09	0.01 ± 0.05*	0.01 ± 0.04*	0.01 ± 0.04*	0.01 ± 0.04*	0.01 ± 0.04*	0.01 ± 0.04*	0.01 ± 0.04*	<0.0001
Vitamin E	0.81 ± 0.21	0.80 ± 0.21	0.83 ± 0.19*	0.83 ± 0.19*	0.84 ± 0.19*	0.85 ± 0.18*	0.85 ± 0.18*	0.86 ± 0.17*	<0.0001
Iodine	0.72 ± 0.29	0.65 ± 0.31*	0.64 ± 0.31*	0.64 ± 0.31*	0.64 ± 0.31*	0.64 ± 0.31*	0.64 ± 0.31*	0.64 ± 0.31*	<0.0001
Magnesium	0.50 ± 0.35	0.51 ± 0.35	0.53 ± 0.35*	0.55 ± 0.35*	0.57 ± 0.35*	0.59 ± 0.34*	0.61 ± 0.34*	0.64 ± 0.33*	<0.0001
Phosphorus	0.97 ± 0.07	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.07	0.97 ± 0.07	<0.05
Potassium	0.31 ± 0.24	0.28 ± 0.24*	0.30 ± 0.23	0.32 ± 0.23	0.34 ± 0.24*	0.37 ± 0.25*	0.40 ± 0.25*	0.43 ± 0.26*	<0.0001
Selenium	0.89 ± 0.13	0.89 ± 0.14*	0.89 ± 0.14	0.89 ± 0.14	0.89 ± 0.14	0.89 ± 0.13	0.89 ± 0.13	0.89 ± 0.13	NS
Zinc	0.32 ± 0.29	0.14 ± 0.20*	0.15 ± 0.20*	0.14 ± 0.20*	0.14 ± 0.20*	0.14 ± 0.20*	0.14 ± 0.20*	0.14 ± 0.20*	<0.0001
Copper	0.91 ± 0.17	0.93 ± 0.15*	0.93 ± 0.14*	0.93 ± 0.14*	0.94 ± 0.13*	0.94 ± 0.13*	0.94 ± 0.13*	0.95 ± 0.12*	<0.0001
Manganese	0.91 ± 0.14	0.94 ± 0.10*	0.95 ± 0.10*	0.95 ± 0.10*	0.95 ± 0.09*	0.96 ± 0.09*	0.96 ± 0.09*	0.96 ± 0.09*	<0.0001
Calcium	0.65 ± 0.34	0.53 ± 0.35*	0.56 ± 0.35*	0.56 ± 0.35*	0.57 ± 0.35*	0.58 ± 0.35*	0.58 ± 0.35*	0.59 ± 0.35*	NS
Iron	0.60 ± 0.29	0.48 ± 0.28*	0.51 ± 0.28*	0.52 ± 0.28*	0.53 ± 0.28*	0.53 ± 0.28*	0.54 ± 0.28*	0.54 ± 0.28*	NS

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n*=1341. Values are means ± SDs weighted for the survey design. *Significantly different from the mean of 'Baseline Intake'. ALA, alpha-linolenic acid; APF, animal-protein food; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; NS, nonsignificant; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; PPF, plant-protein food; SFA, saturated fatty acids.

[2] 'Prevailing mix': combination of mean PPFs at their current contribution to plant-protein intake in the general population. 'x% diversified mix': reduction by x% of the contribution of "Refined grains" to the prevailing mix.

[3] *P* values are *P*-trends for linear models adjusted for sex. NS, *P* ≥0.05.

Supplemental Table 11. PANDiet, MS, AS and probability of adequacy for AS in the general population before the substitution of APFs ('Baseline intake') and after the modelled replacement of 100% of APFs with PPFs initially consumed by individuals ('Model 1: Initial food pattern') or with a virtual mix of mean PPFs at different levels of diversity ('Model 2: Substitution with a mix of mean PPFs of graded diversity') in the French adult population[1].

	Baseline intake	Simulation of the substitution of 100% of APFs with PPFs							
		Model 1: Initial food pattern	Model 2: Substitution with a mix of mean PPFs of graded diversity[2]						
			Prevailing mix	20% diversified mix	40% diversified mix	60% diversified mix	80% diversified mix	100% diversified mix	*P*[3]
PANDiet score (0-100)	58.9 ± 6.14	61.5 ± 5.67*	63.4 ± 5.47*	64.0 ± 5.54*	64.7± 5.63*	65.3 ± 5.72*	66.0 ± 5.83*	66.7 ± 5.94*	<0.0001
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	55.2 ± 14.7	72.7 ± 10.4*	72.3 ± 10.5*	72.2 ± 10.6*	72.1 ± 10.8*	71.9 ± 10.9*	71.8 ± 11.1*	71.6 ± 11.3*	<0.0001
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	62.6 ± 11.9	50.4 ± 11.5*	54.6 ± 11.1*	55.9 ± 11.0*	57.3 ± 10.9*	58.7 ± 10.8*	60.3 ± 10.7*	61.8 ± 10.6	<0.0001
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)									
Protein	0.91 ± 0.17	0.65 ± 0.33*	0.67 ± 0.33*	0.68 ± 0.33*	0.69 ± 0.32*	0.69 ± 0.32*	0.70 ± 0.37*	0.71 ± 0.31*	<0.0001
Total fat	0.67 ± 0.27	0.28 ± 0.28*	0.27 ± 0.26*	0.29 ± 0.27*	0.31 ± 0.27*	0.34 ± 0.28*	0.37 ± 0.28*	0.40 ± 0.28*	<0.0001
LA	0.44 ± 0.33	0.35 ± 0.33*	0.38 ± 0.32*	0.43 ± 0.32	0.49 ± 0.32*	0.55 ± 0.32*	0.62 ± 0.30*	0.69 ± 0.28*	<0.0001
ALA	0.11 ± 0.21	0.11 ± 0.21	0.09 ± 0.19	0.10 ± 0.20	0.11 ± 0.21	0.12 ± 0.22	0.13 ± 0.23*	0.15 ± 0.24*	<0.0001
DHA	0.22 ± 0.33	0.04 ± 0.14*	0.04 ± 0.14*	0.04 ± 0.14*	0.04 ± 0.14*	0.04 ± 0.14*	0.04 ± 0.14*	0.04 ± 0.14*	<0.0001
EPA+DHA	0.25 ± 0.35	0.04 ± 0.14*	0.04 ± 0.13*	0.04 ± 0.13*	0.04 ± 0.13*	0.04 ± 0.13*	0.04 ± 0.13*	0.03 ± 0.13*	<0.0001
Fiber	0.34 ± 0.34	0.66 ± 0.32*	0.72 ± 0.31*	0.74 ± 0.30*	0.77 ± 0.28*	0.79 ± 0.27*	0.81 ± 0.26*	0.83 ± 0.25*	<0.0001
Vitamin A	0.50 ± 0.36	0.34 ± 0.34*	0.36 ± 0.34*	0.39 ± 0.34*	0.41 ± 0.35*	0.44 ± 0.35*	0.47 ± 0.35*	0.50 ± 0.35	<0.0001
Thiamine	0.96 ± 0.07	0.91 ± 0.14*	0.98 ± 0.05*	0.98 ± 0.05*	0.98 ± 0.05*	0.99 ± 0.04*	0.99 ± 0.04*	0.99 ± 0.03*	<0.0001
Riboflavin	0.89 ± 0.19	0.54 ± 0.35*	0.67 ± 0.32*	0.67 ± 0.32*	0.68 ± 0.32*	0.69 ± 0.31*	0.70 ± 0.31*	0.71 ± 0.31*	<0.01
Niacin	0.90 ± 0.19	0.67 ± 0.34*	0.80 ± 0.28*	0.81 ± 0.27*	0.83 ± 0.26*	0.84 ± 0.25*	0.85 ± 0.24*	0.86 ± 0.23*	<0.0001
Pantothenic acid	0.87 ± 0.17	0.77 ± 0.22*	0.84 ± 0.19*	0.85 ± 0.19*	0.85 ± 0.19*	0.85 ± 0.19*	0.85 ± 0.18*	0.85 ± 0.18*	<0.0001
Vitamin B-6	0.69 ± 0.31	0.50 ± 0.35*	0.64 ± 0.33*	0.67 ± 0.32	0.70 ± 0.31	0.73 ± 0.30*	0.75 ± 0.29*	0.78 ± 0.27*	<0.0001
Folate	0.66 ± 0.32	0.67 ± 0.32	0.78 ± 0.27*	0.80 ± 0.26*	0.82 ± 0.25*	0.84 ± 0.23*	0.86 ± 0.22*	0.87 ± 0.21*	<0.0001
Vitamin B-12	0.65 ± 0.33	0.09 ± 0.20*	0.09 ± 0.19*	0.08 ± 0.19*	0.08 ± 0.19*	0.08 ± 0.19*	0.08 ± 0.18*	0.08 ± 0.18*	<0.0001
Vitamin C	0.41 ± 0.39	0.45 ± 0.39*	0.55 ± 0.38*	0.58 ± 0.38*	0.61 ± 0.37*	0.64 ± 0.36*	0.66 ± 0.35*	0.69 ± 0.34*	<0.0001
Vitamin D	0.03 ± 0.09	0.004 ± 0.04*	0.003 ± 0.03*	0.003 ± 0.03*	0.003 ± 0.03*	0.003 ± 0.03*	0.003 ± 0.03*	0.003 ± 0.03*	<0.0001
Vitamin E	0.81 ± 0.21	0.79 ± 0.22*	0.85 ± 0.18*	0.86 ± 0.18*	0.86 ± 0.17*	0.87 ± 0.16*	0.88 ± 0.16*	0.89 ± 0.15*	<0.0001
Iodine	0.72 ± 0.29	0.52 ± 0.34*	0.50 ± 0.33*	0.50 ± 0.33*	0.50 ± 0.33*	0.50 ± 0.33*	0.50 ± 0.33*	0.50 ± 0.33*	<0.0001
Magnesium	0.50 ± 0.35	0.50 ± 0.35	0.56 ± 0.35*	0.59 ± 0.34*	0.63 ± 0.33*	0.67 ± 0.32*	0.70 ± 0.31*	0.73 ± 0.30*	<0.0001
Phosphorus	0.97 ± 0.07	0.96 ± 0.10*	0.97 ± 0.09	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08*	<0.0001
Potassium	0.31 ± 0.24	0.26 ± 0.24*	0.29 ± 0.22*	0.33 ± 0.23*	0.38 ± 0.24*	0.44 ± 0.25*	0.50 ± 0.26*	0.56 ± 0.27*	<0.0001
Selenium	0.89 ± 0.13	0.85 ± 0.17*	0.87 ± 0.16*	0.87 ± 0.16*	0.87 ± 0.15*	0.88 ± 0.15*	0.88 ± 0.15*	0.88 ± 0.15*	NS
Zinc	0.32 ± 0.29	0.03 ± 0.08*	0.04 ± 0.09*	0.04 ± 0.09*	0.04 ± 0.09*	0.04 ± 0.09*	0.04 ± 0.09*	0.04 ± 0.09*	<0.0001
Copper	0.91 ± 0.17	0.94 ± 0.14*	0.94 ± 0.13*	0.95 ± 0.12*	0.95 ± 0.11*	0.96 ± 0.11*	0.96 ± 0.11*	0.96 ± 0.10*	<0.0001
Manganese	0.91 ± 0.14	0.96 ± 0.09*	0.97 ± 0.08*	0.97 ± 0.08*	0.97 ± 0.08*	0.97 ± 0.07*	0.97 ± 0.07*	0.97 ± 0.07*	<0.0001
Calcium	0.65 ± 0.34	0.35 ± 0.33*	0.41 ± 0.34*	0.42 ± 0.34*	0.44 ± 0.34*	0.45 ± 0.34*	0.47 ± 0.34*	0.49 ± 0.35*	<0.0001
Iron	0.60 ± 0.29	0.40 ± 0.26*	0.47 ± 0.26*	0.48 ± 0.27*	0.49 ± 0.27*	0.50 ± 0.27*	0.52 ± 0.27*	0.53 ± 0.27*	<0.001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n*=1341. Values are means ± SDs weighted for the survey design. *Significantly different from the mean of 'Baseline Intake'. ALA, alpha-linolenic acid; APF, animal-protein food; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; NS, nonsignificant; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; PPF, plant-protein food; SFA, saturated fatty acids.

[2] 'Prevailing mix': combination of mean PPFs at their current contribution to plant-protein intake in the general population. 'x% diversified mix': reduction by x% of the contribution of "Refined grains" to the prevailing mix.

[3] *P* values are *P*-trends for linear models adjusted for sex. NS, *P* ≥0.05.

Supplemental Table 12. Protein intakes in the general population before the substitution of APFs ('Baseline intake') and after the modelled replacement of 50% of APFs with PPFs initially consumed by individuals ('Model 1: Initial food pattern') or with a virtual mix of mean PPFs at different levels of diversity ('Model 2: Substitution with a mix of mean PPFs of graded diversity') in the French adult population[1].

		Simulation of the substitution of 50% of APFs with PPFs							
			Model 2: Substitution with a mix of mean PPFs of graded diversity[2]						
	Baseline intake	**Model 1: Initial food pattern**	**Prevailing mix**	**20% diversified mix**	**40% diversified mix**	**60% diversified mix**	**80% diversified mix**	**100% diversified mix**	***P*[3]**
Total protein[4], *g/d*	83.5 ± 19.2	69.1 ± 12.7*	69.4 ± 12.4*	69.6 ± 12.5*	69.9 ± 12.5*	70.2 ± 12.6*	70.5 ± 12.7*	70.8 ± 12.8*	<0.0001
Animal protein[4], *g/d*	55.8 ± 20.1	34.6 ± 11.1*	34.6 ± 11.1*	34.6 ± 11.1*	34.6 ± 11.1*	34.6 ± 11.1*	34.6 ± 11.1*	34.6 ± 11.1*	<0.0001
Plant protein[4], *g/d*	27.7 ± 6.15	34.5 ± 6.6*	34.8 ± 6.08*	35.1 ± 6.11*	35.3 ± 6.15*	35.6 ± 6.19*	35.9 ± 6.23*	36.3 ± 6.29*	<0.0001
Plant protein, *% of total protein*	33.4 ± 9.76	50.0 ± 8.87*	50.4 ± 8.64*	50.5 ± 8.60*	50.7 ± 8.56*	50.9 ± 8.51*	51.2 ± 8.47*	51.4 ± 8.42*	<0.0001
Protein from plant-based families, *% of plant protein*									
Grains	61.3 ± 15.1	64.4 ± 15.7*	63.6 ± 11.8*	61.4 ± 11.8	59.0 ± 11.9*	56.5 ± 12.0*	53.9 ± 12.2*	51.1 ± 12.5*	<0.0001
of which refined grains	56.2 ± 18.2	58.8 ± 19.4*	58.4 ± 14.3*	55.5 ± 14.3	52.6 ± 14.4*	49.4 ± 14.6*	46.1 ± 14.8*	42.6 ± 15.24*	<0.0001
of which whole grains	5.07 ± 9.37	5.60 ± 10.6	5.26 ± 7.46	5.83 ± 7.41	6.45 ± 7.37*	7.10 ± 7.34*	7.78 ± 7.31*	8.50 ± 7.30*	<0.0001
Vegetables	11.6 ± 8.28	11.1 ± 9.09*	12.0 ± 6.48	12.6 ± 6.46*	13.2 ± 6.46*	13.8 ± 6.46*	14.5 ± 6.47*	15.2 ± 6.50*	<0.0001
Potatoes	6.77 ± 7.27	6.04 ± 6.82*	6.96 ± 5.70	7.53 ± 5.69*	8.15 ± 5.69*	8.80 ± 5.70*	9.47 ± 5.72*	10.2 ± 5.75*	<0.0001
Fruits	5.51 ± 4.99	4.47 ± 4.07*	4.27 ± 3.69*	4.24 ± 3.66*	4.20 ± 3.63*	4.17 ± 3.60*	4.13 ± 3.57*	4.09 ± 3.53*	<0.0001
Nuts and seeds	3.19 ± 6.27	3.28 ± 6.69	3.35 ± 5.13	3.93 ± 5.08*	4.55 ± 5.05*	5.17 ± 5.03*	5.87 ± 5.02*	6.58 ± 5.02*	<0.0001
Legumes	2.91 ± 6.99	3.44 ± 8.50	3.03 ± 5.60	3.63 ± 5.55*	4.23 ± 5.52*	4.85 ± 5.50*	5.55 ± 5.49*	6.27 ± 5.49*	<0.0001
Other plant foods (spices, beverages)	8.72 ± 6.72	7.27 ± 6.16*	6.82 ± 5.29*	6.77 ± 5.25*	6.72 ± 5.22*	6.66 ± 5.18*	6.60 ± 5.14*	6.54 ± 5.09*	<0.0001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n*=1341. Values are means ± SDs weighted for the survey design. *Significantly different from the mean of 'Baseline Intake'. APF, animal-protein food; PPF, plant-protein food.
[2] 'Prevailing mix': combination of mean PPFs at their current contribution to plant-protein intake in the general population. 'x% diversified mix': reduction by x% of the contribution of "Refined grains" to the prevailing mix.
[3] *P* values are *P*-trends for linear models adjusted for sex.
[4] Energy-adjusted using the residual method (percentage of plant protein was calculated with plant and animal protein not adjusted).

Supplemental Table 13. Protein intakes in the general population before the substitution of APFs ('Baseline intake') and after the modelled replacement of 100% of APFs with PPFs initially consumed by individuals ('Model 1: Initial food pattern') or with a virtual mix of mean PPFs at different levels of diversity ('Model 2: Substitution with a mix of mean PPFs of graded diversity') in the French adult population[1].

	Baseline intake	Simulation of the substitution of 100% of APFs with PPFs							
		Model 1: Initial food pattern	Model 2: Substitution with a mix of mean PPFs of graded diversity[2]						
			Prevailing mix	20% diversified mix	40% diversified mix	60% diversified mix	80% diversified mix	100% diversified mix	*P*[3]
Total protein[4], *g/d*	83.5 ± 19.2	54.6 ± 9.66*	55.2 ± 8.54*	55.7 ± 8.58*	56.2 ± 8.64*	56.8 ± 8.71*	57.4 ± 8.79*	58.1 ± 8.89*	<0.0001
Animal protein[4], *g/d*	55.8 ± 20.1	13.3 ± 8.69*	13.3 ± 8.69*	13.3 ± 8.69*	13.3 ± 8.69*	13.3 ± 8.69*	13.3 ± 8.69*	13.3 ± 8.69*	<0.0001
Plant protein[4], *g/d*	27.7 ± 6.15	41.3 ± 8.76*	41.9 ± 7.64*	42.4 ± 7.80*	43.0 ± 7.96*	43.5 ± 8.14*	44.2 ± 8.35*	44.8 ± 8.57*	<0.0001
Plant protein, *% of total protein*	33.4 ± 9.76	77.4 ± 12.9*	77.8 ± 12.6*	78.0 ± 12.5*	78.2 ± 12.5*	78.4 ± 12.4*	78.6 ± 12.3*	78.8 ± 12.3*	<0.0001
Protein from plant-based families, *% of plant protein*									
Grains	61.3 ± 15.1	66.4 ± 16.6*	65.0 ± 10.0*	61.3 ± 9.96	57.6 ± 10.1*	53.7 ± 10.3*	49.5 ± 10.7*	45.2 ± 11.2*	<0.0001
of which refined grains	56.2 ± 18.2	60.5 ± 20.6*	59.6 ± 12.1*	55.1 ± 12.0	50.3 ± 12.2*	45.4 ± 12.5*	40.2 ± 13.0*	34.8 ± 13.7*	<0.0001
of which whole grains	5.07 ± 9.37	5.92 ± 11.6*	5.38 ± 6.30	6.28 ± 6.24*	7.27 ± 6.21*	8.30 ± 6.18*	9.34 ± 6.17*	10.5 ± 6.18*	<0.0001
Vegetables	11.6 ± 8.28	10.7 ± 10.1*	12.2 ± 5.43	13.1 ± 5.41*	14.1 ± 5.42*	15.1 ± 5.44*	16.2 ± 5.48*	17.3 ± 5.54*	<0.0001
Potatoes	6.77 ± 7.27	5.60 ± 6.84*	7.08 ± 4.77	8.01 ± 4.77*	8.98 ± 4.78*	10.0 ± 4.82*	11.1 ± 4.87*	12.2 ± 4.95*	<0.0001
Fruits	5.51 ± 4.99	3.85 ± 3.66*	3.53 ± 3.04*	3.49 ± 3.00*	3.45 ± 2.96*	3.40 ± 2.93*	3.35 ± 2.89*	3.30 ± 2.85*	<0.0001
Nuts and seeds	3.19 ± 6.27	3.35 ± 7.09	3.44 ± 4.39	4.37 ± 4.33*	5.35 ± 4.30*	6.33 ± 4.30*	7.41 ± 4.31*	8.50 ± 4.35*	<0.0001
Legumes	2.91 ± 6.99	3.72 ± 9.33*	3.11 ± 4.79	4.08 ± 4.74*	5.02 ± 4.70*	6.00 ± 4.69*	7.08 ± 4.7*	8.19 ± 4.73*	<0.0001
Other plant foods (spices, beverages)	8.72 ± 6.72	6.38 ± 6.02*	5.67 ± 4.48*	5.60 ± 4.43*	5.53 ± 4.39*	5.46 ± 4.34*	5.39 ± 4.29*	5.31 ± 4.24*	<0.0001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n*=1341. Values are means ± SDs weighted for the survey design. *Significantly different from the mean of 'Baseline Intake'. APF, animal-protein food; PPF, plant-protein food.
[2] 'Prevailing mix': combination of mean PPFs at their current contribution to plant-protein intake in the general population. 'x% diversified mix': reduction by x% of the contribution of "Refined grains" to the prevailing mix.
[3] *P* values are *P*-trends for linear models adjusted for sex.
[4] Energy-adjusted using the residual method (percentage of plant protein was calculated with plant and animal protein not adjusted).

Supplemental References

1. de Oliveira Otto MC, Padhye NS, Bertoni AG, Jacobs DR, Mozaffarian D. Everything in Moderation - Dietary Diversity and Quality, Central Obesity and Risk of Diabetes. Portero-Otin M, editor. PLOS ONE. 2015;10:e0141341.

2. Drescher LS, Thiele S, Mensink GBM. A new index to measure healthy food diversity better reflects a healthy diet than traditional measures. J Nutr. 2007;137:647–51.

3. Katanoda K, Kim H-S, Matsumura Y. New Quantitative Index for Dietary Diversity (QUANTIDD) and its annual changes in the Japanese. Nutrition. 2006;22:283–7.

4. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA3) [Internet]. 2017 Jun. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf

5. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. Nutrients. 2018;10:226.

6. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles [Internet]. 2016 Dec. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf

7. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, Paineau D, Huneau J-F. Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. Cameron DW, editor. PLoS ONE. 2012;7:e42155.

2.2. Article n°2 : La consommation d'aliments peu ou pas transformés est associée à un profil favorable de consommation protéique, à une meilleure qualité de l'alimentation et à un moindre risque cardiométabolique dans la population adulte française (INCA3), à l'inverse de la consommation de produits ultra-transformés.

Résumé

Contexte : Les produits dits ultra-transformés occupent aujourd'hui une place importante dans nos habitudes alimentaires mais leur consommation excessive serait associée à un risque plus élevé de morbi-mortalité. En parallèle, une transition alimentaire en faveur des protéines végétales est encouragée à la fois pour réduire l'impact environnemental de notre alimentation et pour les bénéfices sur la santé associés à leur consommation. Cependant, ces bénéfices semblent dépendre de la nature des aliments végétaux consommés. Ainsi, il est intéressant d'examiner les relations entre le degré de transformation de l'alimentation et la consommation de protéines, et la qualité de l'alimentation associée.

Objectifs : Etudier les relations entre le degré de transformation de l'alimentation, la consommation de protéines, la qualité de l'alimentation et le risque cardiométabolique.

Méthode : En appliquant la classification NOVA aux aliments de la base INCA3, nous avons évalué le pourcentage d'énergie provenant des aliments bruts (peu ou pas transformés), des aliments transformés et des aliments ultra-transformés dans le régime alimentaire de 1774 adultes français (18-79 ans) de l'étude INCA3 (2014-2015). Nous avons étudié les associations entre la consommation des différents groupes de la classification NOVA, la consommation de protéines, la qualité de l'alimentation (évaluée avec le PANDiet et les scores de végétalisation PDI, et ses versions saine (hPDI) et moins saine (uPDI)), et le risque cardiométabolique. Le risque cardiométabolique a été étudié avec l'estimation de la mortalité évitée ou ajoutée associée à un changement de consommation alimentaire à l'aide du modèle EpiDiet, basé sur une évaluation comparative des risques.

Résultats : Les forts consommateurs de produits bruts consomment plus de protéines animales et ont une meilleure diversité protéique végétale, alors que les forts consommateurs de produits transformés consomment plus de protéines végétales mais avec une moins bonne diversité et que les forts consommateurs de produits ultra-transformés consomment moins de protéines végétales. Le PANDiet et le hPDI sont associés à la consommation de produits bruts (respectivement $\beta=0,14$ et $\beta=0,04$) et inversement associés à la consommation de produits ultra-transformés (respectivement $\beta=-0,05$ et $\beta=-0,07$). Le uPDI est inversement associé à la consommation de produits bruts ($\beta=-0,13$) et associé à la consommation de produits transformés ($\beta=0,04$) et ultra-transformés ($\beta=0,06$). Ces associations sont modifiées après ajustements sur la consommation de protéines et la diversité protéique végétale. Au moyen du modèle d'évaluation du risque sanitaire à long terme, EpiDiet, nous avons montré qu'une plus forte consommation de produits bruts serait associé à une mortalité réduite de 25%, 31% et 19% pour les maladies cérébrovasculaires, les maladies coronariennes et le diabète, respectivement. A l'inverse, pour les produits transformés, la mortalité pour ces trois maladies serait augmentée de 20%, 11%, 16% (respectivement) et pour les produits-ultra-transformés, la mortalité serait augmentée de 19%, 42% et 30%.

Conclusion : Nous avons montré que le profil de consommation protéique varie en fonction du degré de transformation de l'alimentation. La consommation de produits bruts est associée à une alimentation de meilleure qualité, qui serait associé à un moindre risque de mortalité cardiométabolique, à l'inverse de la consommation de produits ultra-transformés et, dans une moindre mesure, la consommation de produits transformés.

Valorisation : Ce travail a été publié dans la revue *European Journal of Nutrition* le 8 mai 2021. La version présentée ci-après n'est pas la version publiée, mais la version acceptée pour publication dans *European Journal of Nutrition*, après examen par des pairs. La version, après travail d'édition, publiée, est disponible sur le lien suivant : https://doi.org/10.1007/s00394-021-02576-2

Messages clés

- Les aliments ultra-transformés contribuent à 31% de l'apport énergétique total, les aliments bruts à 33%.
- La consommation de produits bruts est associée à la consommation de protéines animales, une meilleure diversité des protéines végétales, une meilleure qualité de l'alimentation et un moindre risque de mortalité cardiométabolique
- La consommation de produits transformés est associée à la consommation de protéines végétales avec une moins bonne diversité au sein des sources de protéines végétales et un risque plus élevé de mortalité cardiométabolique
- La consommation de produits ultra-transformés est associée à une moindre consommation de protéines végétales, une alimentation de moins bonne qualité et un risque plus élevé de mortalité cardiométabolique

Contrary to ultra-processed foods, the consumption of unprocessed or minimally processed foods is associated with favorable patterns of protein intake, diet quality and lower cardiometabolic risk in French adults (INCA3).

Marion Salomé[1§], Laura Arrazat[1§], Juhui Wang[1], Ariane Dufour[2], Carine Dubuisson[2], Jean-Luc Volatier[2], Jean-François Huneau[1], François Mariotti[1]*

[1]Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France
[2]Risk Assessment Department, Methodology and Survey Unit, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES), 14 rue Pierre et Marie Curie, 94701 Maisons-Alfort Cedex, France
§ These authors contributed equally to this work.

Short title: Ultra-processed foods, protein intake and diet quality

* Corresponding author: François Mariotti, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France, francois.mariotti@agroparistech.fr

ORCID number:
Jean-François Huneau : 0000-0001-7336-2617 ; François Mariotti: 0000-0002-4516-3853

Acknowledgments
The authors would like to thank Benjamin Allès (Nutritional Epidemiology Research Team (EREN) at Université Paris 13, France) for his scientific support in constructing the NOVA database and Emmanuelle Kesse-Guyot (Nutritional Epidemiology Research Team (EREN) at Université Paris 13, France) for her scientific contribution to the constitution of the disease mortality database for the EpiDiet model.

List of abbreviations

ANSES, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety; AS, Adequacy Subscore; BI, Berry-Index; BI-ABF, Berry-Index – Animal-based families; BI-PBF, Berry-Index – Plant-based families; CIQUAL, French Centre for Information on Food Quality; EpiDiet, Evaluate the Potential Impact of a Diet; hPDI, healthful Plant-based Diet Index; INCA3, Third Individual and National Study on Food Consumption Survey; MPF, unprocessed/minimally processed foods; MPFp, proportion of total energy intake from MPF; MS, Moderation Subscore; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; PDI, Plant-based Diet Index; PF, processed foods; PFp, proportion of total energy intake from PF; uPDI, unhealthful Plant-based Diet Index; UI, uncertainty interval; UPF, ultra-processed foods; UPFp, proportion of total energy intake from UPF.

Declarations

Funding
M Salomé's PhD fellowship is currently being funded by a research contract with Terres Univia, the French Interbranch organization for plant oils and proteins. F Mariotti is the scientific leader of this contract.

Conflicts of interest/Competing interests
The authors declare that they have no competing interests.

Ethics approval
The INCA3 study was carried out in accordance with the Declaration of Helsinki guidelines and was approved by the 'Comité Consultatif sur le Traitement de l'Information en matière de Recherche dans le domaine de la Santé' (Advisory Committee on Information Processing in Health Research).

Consent to participate
For the data collection of the INCA3 survey, oral consent was obtained, witnessed and formally recorded from participants.

Consent for publication
Not applicable

Availability of data and materials
The datasets of the INCA3 survey are available at data.gouv.fr. Data sets generated during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Code availability
Custom code are available from the corresponding author on reasonable request.

Authors' contributions
Marion Salomé, Laura Arrazat and François Mariotti designed research; Marion Salomé, Laura Arrazat and Juhui Wang conducted research; Ariane Dufour, Carine Dubuisson and Jean-Luc Volatier provided the databases essential for the research; Jean-François Huneau provided methodological support. Marion Salomé and Laura Arrazat analyzed data and performed statistical analysis; Marion Salomé, Laura Arrazat, Juhui Wang and François Mariotti interpreted the results; Marion Salomé, Laura Arrazat, Juhui Wang and François Mariotti wrote paper; Marion Salomé and François Mariotti had primary responsibility for the final content and all authors read and approved the final manuscript.

Abstract

Purpose. While the consumption of ultra-processed foods is steadily increasing, there is a growing interest in more sustainable diets that would include more plant protein. We aimed to study associations between the degree of food processing, patterns of protein intake, diet quality and cardiometabolic risk.

Methods. Using the NOVA classification, we assessed the proportion of energy from unprocessed/minimally processed foods (MPFp), processed foods (PFp) and ultra-processed foods (UPFp) in the diets of 1774 adults (18-79y) from the latest cross-sectional French national survey (INCA3, 2014-2015). We studied the associations between MPFp, PFp and UPFp with protein intakes, diet quality (using the PANDiet scoring system, the global (PDI), healthful (hPDI) and unhealthful (uPDI) plant-based diet indices) and risk of cardiometabolic death (using the EpiDiet model).

Results. MPFp was positively associated with animal protein intake and plant protein diversity, whereas PFp was positively associated with plant protein intake and negatively with plant protein diversity. The PANDiet was positively associated with MPFp (β=0.14, P<0.0001) but negatively with UPFp (β=-0.05, P<0.0001). These associations were modified by adjustment for protein intakes and plant protein diversity. As estimated with comparative risk assessment modeling between extreme tertiles of intake, mortality from cardiometabolic diseases would be decreased with higher MPFp (e.g. by 31% for ischemic heart diseases) and increased with higher UPFp (by 42%) and PFp (by 11%).

Conclusions. In the French population, in contrast with UPFp, higher MPFp was associated with higher animal protein intake, better plant protein diversity, higher diet quality and markedly lower cardiometabolic risk.

Keywords: Ultra-processed Foods, Dietary Plant Protein, Dietary Animal Protein, Diet Quality, Plant-Based Diet.

Introduction

The development of industrially-produced foods is reshaping our food system and therefore influencing diets worldwide. At present, in many high-income countries such as the USA or UK, ultra-processed foods (UPF) (usually defined as convenient food and drink products with high industrially processing and generally many ingredients increasing shelf life and palatability [1, 2]), contribute more than half of dietary energy intake [3, 4]. In middle-income countries, this percentage is lower but is seeing a sharp rise [5]. The UPF available on the market are usually rich in energy, saturated fats, sugar and salt [4, 6]. They also have lower protein content than less processed foods and diets high in UPF have been associated with lower protein intake [4, 7].

In high-income countries, animal-based foods are the major source of protein but also have an important environmental footprint [8, 9]. Therefore, with regard to the global environmental impacts of the food system, a plant-based protein transition seems necessary to achieve more sustainable diets [10, 11].

However, although plant-based diets are known to have a positive impact on health [12–14], plant-based food products differ in terms of their quality and contribution to current diets. In particular, it has been shown that the associations between plant-based diets and incidences of coronary heart disease or type 2 diabetes are dependent on the types of plant foods consumed, whether they are considered as healthy plant foods (e.g. whole grains, fruits, etc.) or less-healthy plant foods such as more processed foods (e.g. sweetened beverages, fries, etc.) [15, 16]. Furthermore, it has been recently reported that some vegetarian diets are associated with high consumption of ultra-processed foods [17] suggesting that the benefit of diets high in plant-based foods may depend on the actual share of ultra-processed foods.

Indeed, an overall increase in the consumption of UPF has been thought to play a major role in the pandemics of obesity and diet-related chronic diseases [18, 19]. Many studies have recently reported associations between the consumption of UPF and non-communicable diseases [20–23] or mortality rates [24, 25]. An inpatient randomized controlled trial, where ultra-processed and unprocessed diets were matched for presented energy and macronutrients, reported that the consumption of ultra-processed foods resulted in a higher energy intake (by ~500 kcal) and a 0.9 kg increase in body weight [26].

Therefore, the aim of this study was to investigate the consumption of foods with different processing degrees and the associated intake of animal or plant protein, the diet quality and predicted long-term health. We hypothesized that the degree of processing of foods in the diet is differentially associated with plant/animal protein sources, and that it could explain the resulting association with the diet quality and cardiometabolic health.

Subjects and Methods

Population and dietary data

The population studied was derived from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3), performed in mainland France in 2014-2015 [27]. INCA3 is a nationwide and representative survey and its methodology and design are fully described elsewhere [28]. Of the 2121 adults (18-79y) who completed the whole protocol of the INCA3 survey, under-reporting participants were excluded from their basal metabolic rate estimated

using the Henry equation [29] and the cutoff points proposed by Black [30]. The final sample thus contained 1774 adults (749 males and 1025 females) (Supplementary Figure S1).

Food and beverage consumption was recorded using three nonconsecutive 24-h dietary recalls (two on weekdays, one at the week-end) over a 3-wk period. Dietary recalls were carried out by phone by professional investigators, assisted by the dietary software GloboDiet [31], and participants were not aware of the days of recall so they could not anticipate it. The nutrient contents of the foods and beverages were extracted from the 2016 database generated by the French Center for Information on Food Quality (*Centre d'Information sur la Qualité des Aliments; CIQUAL)* [32]. Food items were classified into groups and sub-groups. Individual sociodemographic characteristics were collected from face-to-face and self-administered questionnaires [28].

Degree of food processing

The NOVA classification [1] was applied to assess the degree of food processing for each food product in the INCA3 database. This classification encompasses four groups: 1) unprocessed/minimally processed foods (MPF), 2) processed culinary ingredients, 3) processed foods (PF) and 4) ultra-processed foods (UPF). To discriminate different foods between these categories, the classification takes account of the technical processing technique, the presence of additives and product composition. The present study focused on MPF, PF and UPF consumption.

For most of the food items consumed, the method of preparation was known. If the food was homemade, eaten in a restaurant or prepared by an artisan, it was broken down into its ingredients to which the NOVA classification was applied. If the food was industrially processed or came from a fast food restaurant, the NOVA classification was applied directly to the food item according to its degree of processing. If the method of preparation was unknown for a food item eaten by a participant, the most common method of preparation observed in the population for this particular food was assigned. For each participant the proportion (%) of total energy intake from unprocessed/minimally processed foods (MPFp), processed culinary ingredients, processed foods (PFp) and ultra-processed foods (UPFp) was calculated.

Identification of protein sources

Using the decomposition of food items into ingredients, the protein origin of each ingredient was assigned to a food family. Food families were either plant-based ("Refined grains", "Whole grains", "Legumes", "Nuts and seeds", "Fruits", "Vegetables", "Potatoes" and "Other plant foods") or animal-based ("Red meat", "Poultry", "Fish", "Processed meat", "Other meats", "Eggs", "Cheeses", "Milk", "Yogurt", and "Other dairy products").

The contribution of each plant-based family to plant protein intake was characterized using the Berry-Index – Plant-based families (BI-PBF) plant protein diversity index, as previously described [33]. The Berry-Index was used in previous studies to evaluate the evenness of the distribution of total energy intake among food groups [34, 35]. The BI-PBF index is defined as $1 - \sum_{i=0}^{n} {s_i}^2$, where s_i is the share of plant-based family i in plant-protein intake, and n is the total number of plant-based families. A higher score reflects greater diversity with a more balanced contribution of each plant-based family to plant protein intake. Likewise, the Berry-Index – Animal-based families (BI-ABF) was used to assess the diversity of the contribution of animal-based families to animal protein intake.

Nutrient adequacy of the diet

The nutrient adequacy of the diet was assessed using version 3.1. of the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) scoring system [36, 37], based mainly on the dietary reference intake from the 2016 opinion issued by the French Agency for Food, Environmental, and Occupational Health and Safety (ANSES) [38]. The reference values were adapted to take account of the different nutrient requirements of adults aged over 65y [39]. The PANDiet score is the mean of the adequacy subscore (AS) and the moderation subscore (MS). AS is the mean of the probabilities of adequacy for 27 nutrients for which the usual intake should be above a reference value, multiplied by 100. MS is the mean of the probabilities of adequacy for six nutrients for which an upper bound reference value exists, multiplied by 100 (Supplementary Table S1). Each probabilities of adequacy are calculated using the mean intake, the intra-individual (i.e. day-to-day) variability of intake, the inter-individual variability and the nutrient reference value [36]. The PANDiet score ranges from 0 to 100 and the higher the score, the better the overall nutrient adequacy of the diet.

Adherence to a plant-based diet

The Plant-based Diet Indices, developed by Satija et al. [16], were used to assess how much a diet was based on plant-based foods. The PDIs comprise three indices which distinguish plant-based foods according to their impact on health: the overall plant-based diet index (PDI), the healthful plant-based diet index (hPDI) and the unhealthful plant-based diet index (uPDI). To calculate these scores, foods were assigned to healthy plant food groups (whole grains, fruits, vegetables, nuts, legumes, vegetable oils and tea/coffee), less healthy plant food groups (fruit juices, sugar-sweetened beverages, refined grains, potatoes and sweets/desserts), or animal food groups (animal fats, dairy, eggs, fish/seafood, meat and miscellaneous animal-based foods). The consumption of each food group was calculated for each individual. The PDI gives more points to high consumers of plant-based food groups than to those with a high consumption of animal food groups. The hPDI gives more points to high consumers of healthy plant food groups and fewer points to high consumers of less healthy plant food groups and animal food groups. Symmetrically, the uPDI gives more points to high consumers of less healthy plant food groups than to high consumers of healthy plant food groups or animal food groups [15] (Supplementary Table S2).

Predicting the impact on cardiometabolic death

The impact of dietary patterns on cardiometabolic death was evaluated using the EpiDiet (Evaluate the Potential Impact of a Diet) model, which is a simulation-based nutritional and epidemiologic model that implements the Comparative Risk Assessment framework [11, 40], enabling prediction of the positive or negative impact on long-term health that would result from changes in the diet for an individual, group or population, as previously described [41]. The EpiDiet model was written in Python and deployed on a High Performance Computing framework. Two sources of data were used to develop the EpiDiet model. The first source of data was the relative risk estimates that relates the nutritional factors to the disease endpoint and that have been reported in validated international meta-analyses [42–44]. Disease scope was defined according to the International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems [45]. Second, the French population demographics and mortality in 2014 (being the year of the dietary survey) were used, provided respectively by the National Institute of Statistics and Economic Studies (INSEE) [46], and the Epidemiological Centre on Medical Causes of Death (CEPIDC) [47]. Nutritional factors and diseases included in the EpiDiet model are presented in Supplementary Figure S2. In this study, only coronary heart diseases, cerebrovascular diseases and diabetes were considered. The EpiDiet model therefore

evaluated the potential impacts of dietary changes associated with patterns of intake according to food processing on the number of death from these diseases in the French population, if the whole population was adopting the dietary change.

Statistical analysis

The population was stratified into tertiles in three different ways according to the proportion of total energy intake from MPF (MPFp), PF (PFp) or UPF (UPFp) in their diet. Cross-classified frequencies of the MPFp, PFp and UPFp tertiles are presented in Supplementary Table S3.

Categorical variables are presented as percentages, and differences across the tertiles were assessed by χ^2 test. Continuous variables are presented as means ± SEM, adjusted for the season of recall, in order to take into account that the degree of processing may depend on the seasonality of food products. Differences across the tertiles of each NOVA group or between the third tertiles of MPFp, PFp and UPFp within the general population were assessed by ANOVA adjusted for the season of recall. Protein intakes were adjusted for total energy intake using the residual method [48]. The weighting schemes proposed in INCA3 were used to account for the complex survey design.

Associations between diet quality indices (PANDiet and PDIs) and the proportions of total energy intake from MPF, PF and UPF were analyzed using multiple linear regression models. First, the proportions of processed culinary ingredients, PF and UPF were included in the same model in order to study their associations with diet quality indices independently of each other. In this way, associations could be interpreted as the effect of substitution of one of these variables with the proportion of MPF (not included in the model and therefore taken as the reference). Associations with diet quality indices were then estimated separately for the proportions of total energy intake from MPF, PF and UPF, with a further adjustment for protein intakes and/or plant protein diversity. The potential confounding factors included in the models, because of their associations with NOVA groups, were total energy intake (continuous), age (continuous), sex (two levels), educational level (four levels), occupational status (eight levels), city size (five levels), perception of financial status (six levels), season of record (four levels), region of France (five levels) and matrimonial status (five levels).

For each NOVA group (MPF, PF and UPF), the EpiDiet model was implemented to compare the first tertile (baseline scenario) with the third tertile (counterfactual scenario). The number of deaths potentially avoided (or, conversely, added) were simulated among French adults from cerebrovascular, ischemic heart diseases and diabetes if the dietary patterns of the French population would shift from the baseline to the counterfactual scenario, according to the number of deaths observed in 2014 in the French population. The population was stratified 5-year age bands and sex in order to take better account of the disparities regarding diet, diseases and relative risks between groups. All foods and nutrients (except sodium) were adjusted for total energy intake using the residual method [49], while fatty acids were expressed as a percentage of total energy intake. Sensitivity analyses were performed to determine the weight of each nutritional factor in the estimation of number of deaths [50].

All statistical analyses were performed using SAS version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.), except the EpiDiet model that was performed with Python version 3.7.1. Significance was set at $P<0.05$.

Results

In the overall population, MPF contributed to 32.8 ± 12.1% of energy intake, PF to 24.9 ± 12.2% of energy intake and UPF to 30.6 ± 15.8% of energy intake (data not shown).

Participants in the third tertile of MPFp, compared to those in the first tertile, were more likely to be women (57.0% vs 43.4%) and aged over 50y (53.2% vs 29.4%). Participants in the third tertile of PFp, compared to those in the first tertile, were more likely to be men (62.2% vs 40.1%) and aged over 50y (57.2% vs 31.9%). Participants in the third tertile of UPFp, versus those in the first tertile, were more likely to be younger than 35y (46.2% vs 8.7%) with no difference regarding sex (Supplementary Table S4).

Degree of processing and protein consumption

Compared to the first tertile of MPFp, individuals in the third tertile consumed more animal protein (61.0 g/day vs 51.1 g/day) and plant protein (26.4 g/day vs 25.7 g/day) and had a lower contribution of plant protein in the diet (31.2% of total protein intake vs 35.0%). Red meat, poultry, fish and yogurt contributed more to animal protein intake whereas processed meat and cheese contributed less when compared to the first tertile (Supplementary Table S5). Regarding plant protein intake, refined grains had a lower contribution in the third tertile compared to the first (47.3% vs 60.7%) and other plant-based families made greater contributions which resulted in more plant protein diversity, expressed as BI-PBF (0.64 vs 0.55), with a better contribution of different plant protein sources (Fig. 1a).

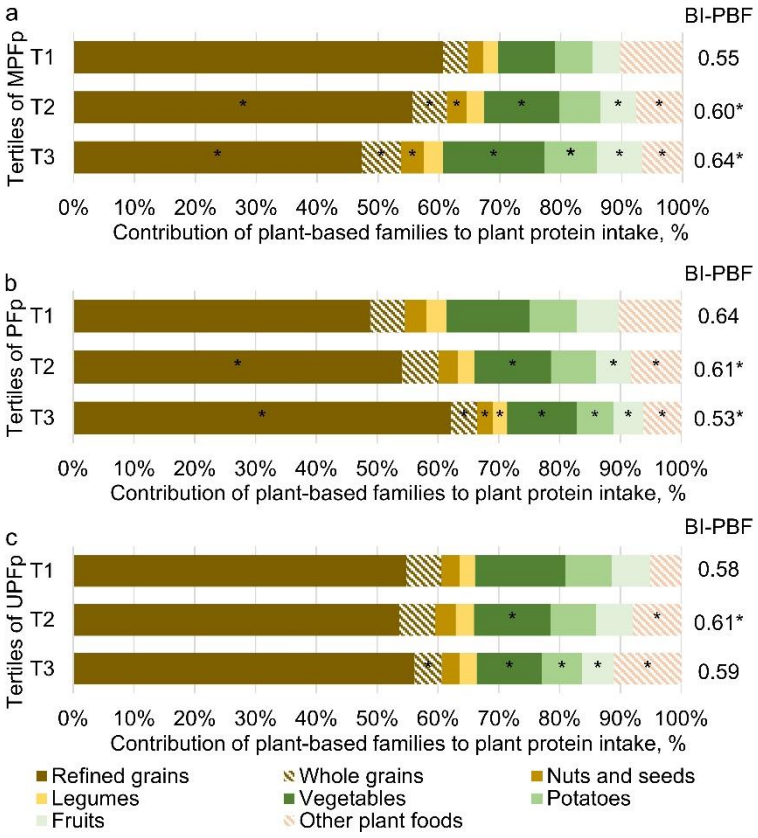


Fig. 1 Contribution of plant-based food families to plant protein intake, expressed as the percentage of plant protein intake, and plant protein diversity, expressed as the Berry-Index – Plant-based families (BI-PBF) across tertiles of the proportion of total energy intake from a. unprocessed/minimally processed foods (MPF), b. processed foods (PF) and c. ultra-

processed foods (UPF) in the French adult population INCA3 (n=1774) (Values are means adjusted for the season of recall; * indicates significantly different from the first tertile)

Total animal protein intake did not change across the tertiles of PFp. However, cheese and processed meat contributed more to animal protein intake whereas milk, eggs and yoghurt contributed less in the third vs the first tertile. Plant protein intake was higher in the third compared to the first tertile of PFp (29.0 g/day vs 23.7 g/day) and so was the proportion of plant protein in the diet (35.7% of total protein intake vs 31.7%) (Supplementary Table S5). The contribution of refined grains to plant protein intake was higher in the third than in the first tertile (62.2% vs 48.8%) resulting in less plant protein diversity (BI-PBF of 0.53 vs 0.64). Therefore, plant protein intake was less evenly distributed among plant protein sources in the third than in the first tertile of PFp (Fig. 1b).

Plant protein intake was lower in the third tertile of UPFp than in the first tertile (24.1 g/day vs 28.4 g/day and 32.3% of total protein intake vs 35.3%). Animal protein intake did not differ significantly across the UPFp tertiles, but when comparing the third tertile with the first, processed meat and milk contributed more to animal protein intake while poultry, fish and cheese contributed less (Supplementary Table S5). Plant protein diversity did not change significantly across the tertiles (Fig. 1c).

Degree of processing and food group consumption

As for protein intakes, mean intakes of food groups differed between the third tertiles of the proportion of MPF, PF and UPF in the diet (Supplementary Figure S3). Compared to the general population, participants in the highest tertile of MPFp consumed more plant foods that are usually minimally processed such as soups (+53%), nuts and oilseeds (+50%), and fruits (+36%), animal foods that are usually minimally processed such as fish (+37%), poultry (+32%) or milk (+31%) and less processed meat (-39%), savory pastries (-52%) and alcoholic beverages (-37%). Participants in the highest tertile of PFp consumed more refined bread (+67%), alcoholic beverages (+51%), cheeses (+40%) and processed meats (+15%) and less breakfast cereals (-63%) and sweet beverages (-48%) compared to the general population. Finally, participants in the highest tertile of UPFp consumed less minimally processed plant or animal foods, and more processed meats (+23%), sweet beverages (+70%), breakfast cereals (+63%), savory pastries (+59%), confectionery and chocolate (+39%) and fruit juices (+34%).

Associations between food processing and diet quality, and related to protein intakes

The PANDiet score and its sub-scores (adequacy sub-score, AS and moderation sub-score, MS) increased with the proportion of MPF and to a lesser extent with the proportion of PF, whereas they decreased in the higher tertile of UPFp. Similarly, the PDI and hPDI scores increased with the proportion of MPF and decreased with the proportion of UPF. The opposite trend was observed for the uPDI score (Fig. 2 and Supplementary Table S6).

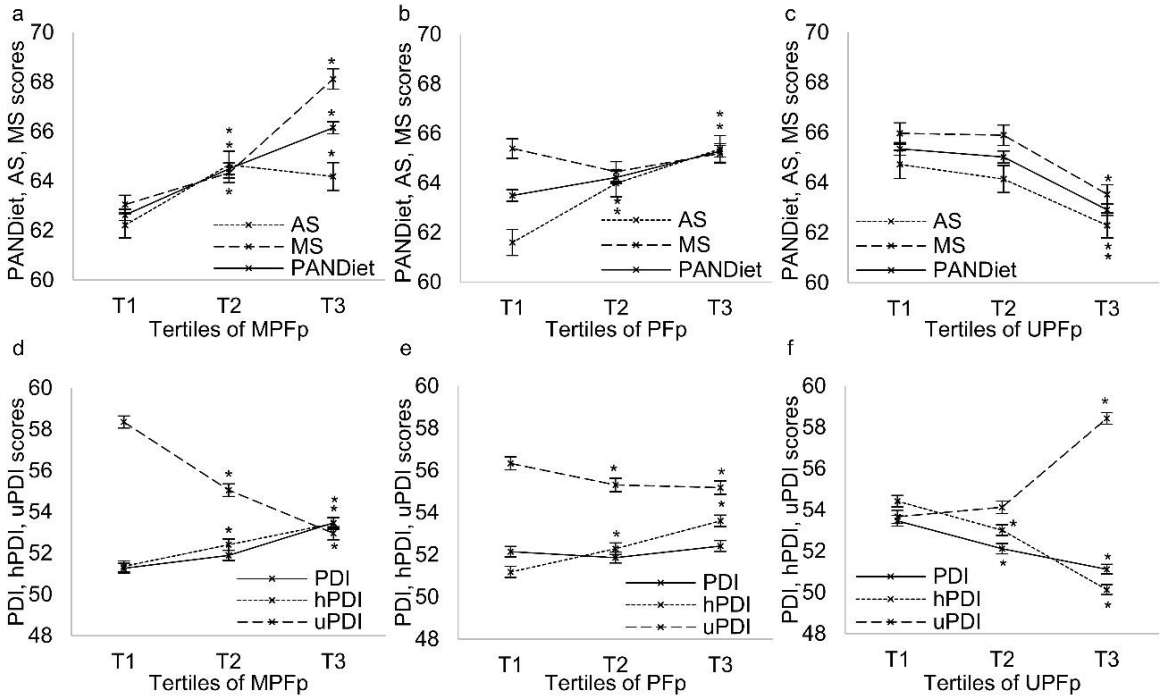


Fig. 2 Diet quality indices across tertiles of the proportion of total energy intake from respectively unprocessed/minimally processed foods (MPFp), processed foods (PFp) and ultra-processed foods (UPFp) in the French adult population INCA3 (n=1774). a, b and c respectively, PANDiet score, Adequacy sub-score (AS) and Moderation sub-score (MS). d, e and f respectively, Plant-based diet (PDI), Healthy plant-based diet (hPDI) and Unhealthy plant-based diet (uPDI) scores (values are means ± SEM adjusted for the season of recall; * indicates significantly different from the first tertile)

In a model using mutually adjusted NOVA categories and representing substitutions for MPFp, PANDiet was negatively associated with increases of PFp (β=-0.11) and UPFp (β=-0.16), while uPDI was positively associated with PFp (β=0.12) and UPFp (β=0.13) and hPDI was negatively associated with UPFp (β=-0.05) but not with PFp (Table 1).

Table 1 Estimated effect of substituting unprocessed/minimally processed foods (MPF) with processed culinary ingredients, processed foods (PF) or ultra-processed foods (UPF) on the PANDiet, hPDI and uPDI diet quality scores under a mutually adjusted multivariate substitution model[a].

	PANDiet		hPDI		uPDI	
	β (95% CI)	*P*	β (95% CI)	*P*	β (95% CI)	*P*
Proportion of total energy intake from PF[b]	-0.11 (-0.14, -0.09)	<0.001	0.00 (-0.03, 0.03)	0.871	0.12 (0.09, 0.16)	<0.001
Proportion of total energy intake from UPF[b]	-0.16 (-0.19, -0.14)	<0.001	-0.05 (-0.08, -0.03)	<0.001	0.13 (0.10, 0.16)	<0.001

[a] Data from the Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, n=1774. Values are regression coefficients (95% CIs) estimated with multiple linear regressions. Data were collected by three 24h recalls.
[b] Model where the proportion of processed culinary ingredients, PF and UPF in the diet were included for mutual adjustment. The proportion of MPF was not included since it was taken as a reference for substitution. The model was adjusted for total energy intake, age, sex, educational level, occupational status, city size, perception of financial status, season of record, region of France and matrimonial status. The association with the proportion of processed culinary ingredients in the diet is not presented since it seems unlikely to substitute foods with culinary ingredients. hPDI, healthy Plant-based Diet Index; NS, non-significant; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake in the Diet; PF, processed foods; uPDI, unhealthy Plant-based diet Index; UPF, ultra-processed foods.

Associations with PANDiet, hPDI and uPDI were then evaluated independently with respect to MPFp, PFp and UPFp variables (Table 2). The PANDiet score was positively associated with

MPFp (β=0.14), and the association was attenuated when controlling for protein intake and/or plant protein diversity (BI-PBF). PANDiet was not associated with PFp but was associated when controlling for BI-PBF (β=0.05) and negatively associated when controlling for protein intake (β=-0.08) and when controlling for protein intake and BI-PBF (β=-0.04). PANDiet was negatively associated with UPFp (β=-0.05) in all models except when controlling only for protein intake. hPDI was positively associated with MPFp (β=0.04) unless controlling for BI-PBF, but not associated with PFp (unless controlling for BI-PBF (β=0.11) or for protein (β=-0.03)), and negatively associated with UPFp (β=-0.07) in all models. uPDI was negatively associated with MPFp (β=-0.13) in all models but the association was attenuated when controlling for protein intake and BI-PBF, and positively associated with PFp (β=0.04), unless when controlling for BI-PBF (β=-0.07), and UPFp (β=0.06) in all models.

Table 2 Associations between the PANDiet, hPDI and uPDI diet quality scores and variables of the NOVA classification (proportion of total energy intake from unprocessed/minimally processed foods (MPF), processed foods (PF) and ultra-processed foods (UPF)) using multivariate models adjusted for the characteristics of protein intake, in the French adult population[a].

	PANDiet		hPDI		uPDI	
	β (95% CI)	*P*	β (95% CI)	*P*	β (95% CI)	*P*
Proportion of total energy intake from MPF						
Basic model[b]	0.14 (0.12, 0.16)	<0.001	0.04 (0.01, 0.06)	0.003	-0.13 (-0.15, -0.10)	<0.001
Controlling for protein intake[c]	0.10 (0.08, 0.12)	<0.001	0.06 (0.03, 0.08)	<0.001	-0.10 (-0.13, -0.07)	<0.001
Controlling for BI-PBF[d]	0.12 (0.10, 0.14)	<0.001	0.00 (-0.03, 0.02)	0.850	-0.07 (-0.10, -0.04)	<0.001
Controlling for protein intake + BI-PBF[e]	0.07 (0.05, 0.09)	<0.001	0.00 (-0.02, 0.03)	0.771	-0.04 (-0.06, -0.01)	0.004
Proportion of total energy intake from PF						
Basic model[b]	0.02 (-0.02, 0.02)	0.965	0.02 (0.00, 0.05)	0.084	0.04 (0.02, 0.07)	0.002
Controlling for protein intake[c]	-0.08 (-0.11, -0.06)	<0.001	-0.03 (-0.05, 0.00)	0.045	0.06 (0.04, 0.09)	<0.001
Controlling for BI-PBF[d]	0.05 (0.03, 0.08)	<0.001	0.11 (0.08, 0.13)	<0.001	-0.07 (-0.10, -0.04)	<0.001
Controlling for protein intake + BI-PBF[e]	-0.04 (-0.06, -0.01)	0.002	0.06 (0.04, 0.09)	<0.001	-0.04 (-0.07, -0.01)	0.005
Proportion of total energy intake from UPF						
Basic model[b]	-0.05 (-0.07, -0.04)	<0.001	-0.07 (-0.09, -0.05)	<0.001	0.06 (0.04, 0.08)	<0.001
Controlling for protein intake[c]	-0.01 (-0.03, 0.00)	0.151	-0.05 (-0.07, -0.03)	<0.001	0.05 (0.03, 0.08)	<0.001
Controlling for BI-PBF[d]	-0.06 (-0.08, -0.05)	<0.001	-0.09 (-0.11, -0.07)	<0.001	0.08 (0.06, 0.10)	<0.001
Controlling for protein intake + BI-PBF[e]	-0.02 (-0.04, 0.00)	0.024	-0.06 (-0.08, -0.04)	<0.001	0.07 (0.05, 0.09)	<0.001

[a] Data from the Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, n=1774. Values are regression coefficients (95% CIs) estimated with multiple linear regressions. Data were collected by three 24h recalls.
[b]Basic model adjusted for total energy intake, age, sex, educational level, occupational status, city size, perception of financial status, season of record, region of France and matrimonial status.
[c]Basic model further adjusted for animal protein and plant protein intakes, both being energy-adjusted using the residual method.
[d]Basic model further adjusted for plant protein diversity, evaluated with the BI-PBF score.
[e]Basic model further adjusted for animal protein and plant protein intakes and plant protein diversity (BI-PBF score).
BI-PBF, Berry-Index – Plant-based families; hPDI, healthy Plant-based Diet Index; MPF, unprocessed/minimally processed foods; NS, non-significant; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; PF, processed foods; uPDI, unhealthy Plant-based diet Index; UPF, ultra-processed foods.

Furthermore, the association between the degree of food processing and its impact on health outcomes was estimated according to the dietary patterns computed from the proportion of total energy intake from MPF, PF and UPF taken separately, using the EpiDiet model. Our simulation revealed that diets containing a higher proportion of MPF could be more beneficial to health (Fig. 3). Compared to the figures of death observed in the French population in 2014 (9,709 deaths from cerebrovascular diseases, 13,020 from ischemic heart diseases and 3,597 from diabetes), consumption of a diet with higher MPFp (consumption pattern of the 3rd tertile of MPFp compared to the 1st tertile) could potentially decrease the number of deaths from cerebrovascular diseases by 25% [23-27%, 95% uncertainty interval] with 2419 deaths being

avoided, from ischemic heart diseases by 31% [29-33%, 95%UI] with 4023 deaths being avoided, and from diabetes by 19% [16-21%, 95%UI] with 665 deaths being avoided. Meanwhile, higher share of UPFp in the diet (consumption pattern of the 3rd tertile of UPFp compared to the 1st tertile) could increase deaths from metabolic diseases: the theoretical percentage of deaths added was 19% [16-22%, 95%UI] for cerebrovascular diseases (+1880 deaths), 42% [11-73%, 95%UI] for ischemic heart diseases (+5448 deaths) and 30% [-3-63%, 95%UI] for diabetes (+1066 deaths). The same numbers for dietary patterns computed from PFp were 20% [18-22%, 95%UI] for cerebrovascular diseases (+1911 deaths), 11% [6-16%, 95%UI] for ischemic heart diseases (+1419 deaths), and 16% [5-26%, 95%UI] for diabetes (+560 deaths). For the estimation of the avoided death with higher MPF consumption, main explaining factors of the model were the higher consumption of fruits and vegetables and the lower consumption of processed meats. For the estimation of the excess death with higher PF consumption, main explaining factors of the model were the lower consumption of nuts and seeds, the higher consumption of sodium and a higher energy intake, whereas for excess death with higher UPF consumption, main explaining factors of the model were the lower consumption of vegetables and the higher consumption of processed meats and sugar-sweetened beverages (Supplementary Table S7).

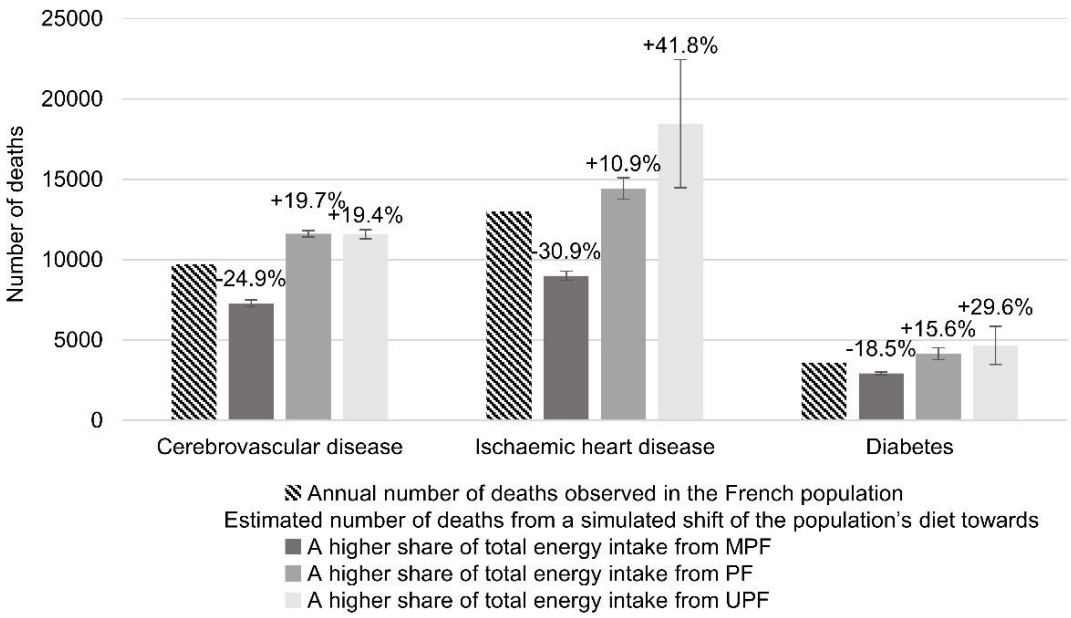


Fig. 3 Estimation of potentially avoided or added cardiometabolic deaths (± 95% CI) when shifting from first to third tertile of MPFp (proportion of total energy intake from unprocessed/minimally processed foods), PFp (proportion of total energy intake from processed foods) and UPFp (proportion of total energy intake from ultra-processed food, as predicted by the EpiDiet (Evaluate the Potential Impact of a Diet), compared to the number of deaths of the French adult population (the percentage corresponds to the percentage of death added (if positive) or avoided (if negative))

Discussion

This study has shown that consumption of MPF was associated with total and animal protein intakes and diet quality; consumption of PF was associated with under-diversified plant protein intake and inversely with diet quality; and consumption of UPF was inversely associated with

total protein intake and diet quality. Most associations between the degree of food processing and diet quality were attenuated when adjusting for total protein intake and plant protein diversity.

The sociodemographic characteristics of people consuming high proportions of MPF and PF in their diet had many similarities and both appeared to contrast with those of individuals eating a high proportion of UPF. Similar sociodemographic profiles for high consumers of MPF had been found in a study in the UK, where women and older people had a higher percentage of energy intake from MPF [51]. The fact that younger adults and people in lower socioeconomic groups consume more UPF has been reported in previous studies [52–54]. This can be taken as an illustration of the continuing shift from traditional diets towards a western diet that is rendered uniform by ultra-processed foods [55].

The degree of food processing was associated with the plant/animal protein pattern. A higher consumption of MPF meant higher intakes of total protein mostly as animal protein. This could be expected inasmuch as the main food groups contributing to animal-based proteins are classified as unprocessed/minimally processed foods such as poultry, red meat, fish, yogurt and milk. With a higher PF consumption, intakes of plant protein were higher, and this could be almost fully ascribed to a much higher intake of bread, under a general pattern that may be referred to as traditional [56, 57]. Indeed, in high PF consumers, 62% of plant protein came from refined grains, which explains why a higher consumption of processed foods was associated with a poorer plant protein diversity, in contrast with high consumers of MPF who had a more diverse plant protein intake. High consumers of UPF had lower protein intakes, as reported in previous studies [51, 58, 59], this could be ascribed to a lower consumption of protein food groups and higher intake of more miscellaneous food groups low in protein such as sweet beverages, pastries or confectionery.

This study provides a fairly comprehensive view of the relationship between the degree of food processing and diet quality. Higher consumers of MPF had greater nutrient adequacy, higher healthful PDI, lower unhealthful PDI, and a lower predicted risk of death from cardiometabolic diseases, whereas the opposite applied among higher consumers of UPF. The results using substitution models clearly showed that substituting MPF by PF or UPF had a detrimental effect on diet quality.

In another French population, poorer compliance with dietary guidelines was found in the highest quartile of ultra-processed food consumers [52]. This association had also been found in the US population where overall dietary quality was measured using a nutrient balanced-pattern PCA-derived factor score [59]. The consumption of UPF has been associated with excessive sugar intake [60] and with lower intakes of vitamins and minerals [58], although this might depend on the level of usage of fortification in the food industry. Regarding long-term health effects of consumption of UPF, our assessment of changes in mortality rates from cardiovascular diseases are in line with findings in the literature, inasmuch as a higher consumption of ultra-processed foods has been associated with a higher risk of all-cause mortality of 31% in the USA [25] and 44% in Spain [24]. Among UK adults, a higher consumption of UPF has also been associated with a higher risk of obesity [61]. While the literature regarding UPF consumption has been growing, characterizing diet quality and the health impact of consuming MPF have been overlooked and the data are scarce [51]. However, it should be noted that a high consumption of MPF is ubiquitous in traditional reference diets such as the Mediterranean diet which has proven health benefits [62].

In our study, using comparative risk assessment on the diets, we estimated higher deaths from cardiovascular diseases with higher consumption of UPF or PF, and lower deaths with higher consumption of MPF. We were able to identify nutritional factors that contributed to estimates of avoided or added death. Differences in BMI and energy intake were important factors for high consumers of MPF and PF, although less than nutritional factors, but they were more secondary for high consumers of UPF. Estimations of deaths from high consumption of UPF are therefore poorly attributable to energy intake and BMI but to other nutritional factors. High consumers of MPF have a dietary pattern that is known to be associated with lower risk of cardiovascular diseases (fruits, vegetables, nuts, but also fish and dairy) whereas high consumers of PF and UPF consumed more food groups known to be associated with higher risk of cardiovascular diseases (refined grains, products rich in sodium, alcohol, sugar-sweetened beverages, etc.) [63, 64]. Furthermore, adherence to overall plant-based diet index (PDI) have been associated with a lower risk of cardiovascular disease, cardiovascular disease mortality and all-cause mortality [65], which is consistent with our findings since PDI only increased with higher share of MPF, where lower estimates of death from cardiovascular diseases were observed. Using modelling analysis to predict the impact of sustainable diets strategies on health, a study found that adopting diets that are more plant-based would decrease mortality up to 12% [66]. The methodological framework used in this study was similar to the Epidiet model that we used, although we included more nutritional factors (24 instead of 9) and only focused on mortality from three diseases.

Beyond showing the association between the degree of processing of the foods consumed and diet quality, the major new finding of this study was that the specific profiles of protein consumption associated with these patterns are an important determinant of the relationship with diet quality. In particular, the association between the proportion of MPF and most diet quality criteria were attenuated when adjusting for protein intake and plant protein diversity. Likewise, the relationships between the proportions of PF and UPF and nutrient adequacy were attenuated or inversed when adjusting for protein intake and plant protein diversity.

Indeed, protein intake is an important determinant of diet quality and this is closely dependent on the type of protein food consumed [13, 56, 67]. Plant protein intake and plant-based diets are generally considered as healthy but there are some unhealthful versions of plant-based diets [15, 16]. This may explain why in our study the consumption of processed foods was associated with lower dietary quality even though it is accompanied by a higher intake of plant protein. Plant protein consumed in high consumers of processed foods, mostly refined grains, may not be an important contributor to diet quality, compared to other sources such as legumes, nuts and seeds, and plant protein diversity appears as a condition for a beneficial effect of plant protein, confirming our earlier report [33].

We believe that our present findings lend further credence to this viewpoint by showing that the relationship between patterns of food processing and diet quality are in part linked to the pattern of plant/animal protein intake. People with a high consumption of MPF have a higher animal protein intake but this comes from raw sources, and they have a better diversity of plant protein intake, all of which explain better diet quality. People with a high consumption of PF would have a better diet quality if the increase in plant protein intake were not at the expense of its diversity [33]. People with a high consumption of UPF have a lower intake of protein foods, a lower plant:animal protein intake and are reliant on diverse ultra-processed foods which taken together have a detrimental effect on their diet quality.

More and more consumers are prone to shift towards a more plant-based diet [68, 69], but this occurs in the context of a food offer that is increasingly dominated by processed and ultra-processed foods which exert an adverse effect on diet quality. This plant-based shift may contribute to improving some aspects of sustainability such as the environmental impact of the diet, but the final impact on its quality and on health outcomes will depend to a great extent on the composition of the plant-based foods and overall diet consumed. Our study has highlighted two possible better pathways, which consist in either increasing the consumption of MPF, preferably with a higher plant protein intake, or choosing processed foods that contribute to an increase in the proportion of plant proteins while maintaining plant protein diversity and enabling the favorable nutrient package traditionally associated with plant proteins.

Limitations of the study

One limitation of this study may concern our use of the NOVA classification, where the ultra-processed foods group is very broad and includes markedly differing foods that have been ascribed to this group for different reasons (presence of additives or highly technological food processing). Some food items are also classified according to their method of preparation, requiring imputations that could be questionable (i.e. systematically considering foods from fast-food restaurant as industrially processed). However, the NOVA classification has been largely employed in the literature and its use offers a clear reference when discussing our results. Another limitation concerns our food composition database. Indeed, a food item with the same overall label was assigned to different NOVA categories depending on its origin despite there being a lack of data regarding its composition. Regarding the study size and generalizability, the present study took advantage of a representative setting in a country with western dietary patterns and an important share of industrial foods, with a diversity of patterns. High consumers of MPF and UPF appear to have dietary patterns comparable to those reported in studies using other samples. High consumers of PF, which represent a more traditional pattern might be less generalizable, but data are lacking for further analysis since this NOVA category has been much less studied. Lastly, although the data came from the latest French national representative survey (in 2014-2015), they may not have been sufficiently recent to reflect current dietary transitions and the increased use of plant-based products.

Conclusion

Although the consumption of UPF has been widely studied in recent years, to our knowledge very few studies have investigated the associations between the consumption of MPF, PF and diet quality. Using a variety of indices, we found that the consumption of MPF was associated with higher diet quality whereas the opposite trend was found with consumption of UPF. We also show that protein consumption patterns differed according to the degree of food processing, and that it explains part of the associations with diet quality. Higher consumers of MPF had a higher protein intake, with a lower plant:animal protein ratio, but they had a healthier plant-based protein intake and a fully favorable dietary pattern. Higher consumers of PF had higher plant protein intakes but lower plant protein diversity, and a greater risk of cardiometabolic death. Higher consumers of UPF had a lower protein intake and poor diet quality on all dimensions, including a markedly higher cardiometabolic risk. We can thus conclude that healthy plant protein patterns are crucial to a future shift in protein intake in the context of a food system that is increasingly dominated by ultra-processed foods.

References

1. Monteiro CA, Cannon G, Levy R, et al (2016) NOVA. The star shines bright. [Food classification Puclib health] World Nutrition 7:28–38

2. Monteiro CA, Cannon G, Levy RB, et al (2019) Ultra-processed foods: what they are and how to identify them. Public Health Nutr 22:936–941. https://doi.org/10.1017/S1368980018003762

3. Martínez Steele E, Baraldi LG, Louzada ML da C, et al (2016) Ultra-processed foods and added sugars in the US diet: evidence from a nationally representative cross-sectional study. BMJ Open 6:e009892. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2015-009892

4. Rauber F, da Costa Louzada ML, Steele E, et al (2018) Ultra-Processed Food Consumption and Chronic Non-Communicable Diseases-Related Dietary Nutrient Profile in the UK (2008–2014). Nutrients 10:587. https://doi.org/10.3390/nu10050587

5. Monteiro CA, Moubarac J-C, Cannon G, et al (2013) Ultra-processed products are becoming dominant in the global food system: Ultra-processed products: global dominance. Obes Rev 14:21–28. https://doi.org/10.1111/obr.12107

6. Monteiro CA, Cannon G, Moubarac J-C, et al (2018) The UN Decade of Nutrition, the NOVA food classification and the trouble with ultra-processing. Public Health Nutr 21:5–17. https://doi.org/10.1017/S1368980017000234

7. Martínez Steele E, Raubenheimer D, Simpson SJ, et al (2018) Ultra-processed foods, protein leverage and energy intake in the USA. Public Health Nutr 21:114–124. https://doi.org/10.1017/S1368980017001574

8. Gerber PJ, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013) Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

9. Wu G, Fanzo J, Miller DD, et al (2014) Production and supply of high-quality food protein for human consumption: sustainability, challenges, and innovations: Sustainability, challenge and innovations. Ann NY Acad Sci 1321:1–19. https://doi.org/10.1111/nyas.12500

10. Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, et al (2018) Options for keeping the food system within environmental limits. Nature 562:519–525. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0

11. Willett W, Rockström J, Loken B, et al (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. The Lancet 393:447–492. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4

12. World Cancer Research Fund, American Institute for Cancer Research. (2018) Diet, nutrition, physical activity and cancer: a global perspective. The third Expert Report

13. Mariotti F (2019) Animal and Plant Protein Sources and Cardiometabolic Health. Adv Nutr 10:S351–S366. https://doi.org/10.1093/advances/nmy110

14. Song M, Fung TT, Hu FB, et al (2016) Association of Animal and Plant Protein Intake With All-Cause and Cause-Specific Mortality. JAMA Intern Med 176:1453. https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2016.4182

15. Satija A, Bhupathiraju SN, Spiegelman D, et al (2017) Healthful and Unhealthful Plant-Based Diets and the Risk of Coronary Heart Disease in U.S. Adults. J Am Coll Cardiol 70:411–422. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.05.047

16. Satija A, Bhupathiraju SN, Rimm EB, et al (2016) Plant-Based Dietary Patterns and Incidence of Type 2 Diabetes in US Men and Women: Results from Three Prospective Cohort Studies. PLoS Med 13:e1002039. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002039

17. Gehring J, Touvier M, Baudry J, et al (2020) Consumption of Ultra-Processed Foods by Pesco-Vegetarians, Vegetarians, and Vegans: Associations with Duration and Age at Diet Initiation. J Nutr nxaa196. https://doi.org/10.1093/jn/nxaa196

18. Moodie R, Stuckler D, Monteiro C, et al (2013) Profits and pandemics: prevention of harmful effects of tobacco, alcohol, and ultra-processed food and drink industries. The Lancet 381:670–679. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)62089-3

19. Vandevijvere S, Jaacks LM, Monteiro CA, et al (2019) Global trends in ultraprocessed food and drink product sales and their association with adult body mass index trajectories. Obesity Reviews 20:10–19. https://doi.org/10.1111/obr.12860

20. Monteiro CA, Cannon G, Lawrence M, et al (2019) Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system. FAO, Rome

21. Fiolet T, Srour B, Sellem L, et al (2018) Consumption of ultra-processed foods and cancer risk: results from NutriNet-Santé prospective cohort. BMJ k322. https://doi.org/10.1136/bmj.k322

22. Mendonça R de D, Lopes ACS, Pimenta AM, et al (2016) Ultra-Processed Food Consumption and the Incidence of Hypertension in a Mediterranean Cohort: The Seguimiento Universidad de Navarra Project. AJHYPE hpw137. https://doi.org/10.1093/ajh/hpw137

23. Nardocci M, Leclerc B-S, Louzada M-L, et al (2019) Consumption of ultra-processed foods and obesity in Canada. Can J Public Health 110:4–14. https://doi.org/10.17269/s41997-018-0130-x

24. Blanco-Rojo R, Sandoval-Insausti H, López-Garcia E, et al (2019) Consumption of Ultra-Processed Foods and Mortality: A National Prospective Cohort in Spain. Mayo Clinic Proceedings 94:2178–2188. https://doi.org/10.1016/j.mayocp.2019.03.035

25. Kim H, Hu EA, Rebholz CM (2019) Ultra-processed food intake and mortality in the USA: results from the Third National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES III, 1988–1994). Public Health Nutr 22:1777–1785. https://doi.org/10.1017/S1368980018003890

26. Hall KD, Ayuketah A, Brychta R, et al (2019) Ultra-Processed Diets Cause Excess Calorie Intake and Weight Gain: An Inpatient Randomized Controlled Trial of Ad Libitum Food Intake. Cell Metabolism 30:67-77.e3. https://doi.org/10.1016/j.cmet.2019.05.008

27. (2017) Opinion of the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety on “the Third Individual and National Survey on Food Consumption (INCA3 Survey).” French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).

28. Dubuisson C, Dufour A, Carrillo S, et al (2019) The Third French Individual and National Food Consumption (INCA3) Survey 2014–2015: method, design and participation rate

in the framework of a European harmonization process. Public Health Nutr 22:584–600. https://doi.org/10.1017/S1368980018002896

29. Henry C (2005) Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. Public Health Nutr 8:1133–1152. https://doi.org/10.1079/PHN2005801

30. Black A (2000) Critical evaluation of energy intake using the Goldberg cut-off for energy intake:basal metabolic rate. A practical guide to its calculation, use and limitations. Int J Obes 24:1119–1130. https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0801376

31. Slimani N, Freisling H, Huybrechts I, et al (2013) Food Consumption Data Collection Methodology for the EU Menu Survey (EMP-PANEU) Final Report. EFSA supporting publication

32. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (2016) ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016

33. Salomé M, de Gavelle E, Dufour A, et al (2019) Plant-Protein Diversity Is Critical to Ensuring the Nutritional Adequacy of Diets When Replacing Animal With Plant Protein: Observed and Modeled Diets of French Adults (INCA3). J Nutr nxz252. https://doi.org/10.1093/jn/nxz252

34. Drescher LS, Thiele S, Mensink GBM (2007) A New Index to Measure Healthy Food Diversity Better Reflects a Healthy Diet Than Traditional Measures. The Journal of Nutrition 137:647–651. https://doi.org/10.1093/jn/137.3.647

35. de Oliveira Otto MC, Padhye NS, Bertoni AG, et al (2015) Everything in Moderation - Dietary Diversity and Quality, Central Obesity and Risk of Diabetes. PLoS ONE 10:e0141341. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141341

36. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, et al (2012) Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. PLoS ONE 7:e42155. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042155

37. de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F (2019) The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. The Journal of Nutrition 149:488–496. https://doi.org/10.1093/jn/nxy275

38. Anses (2016) Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses)., Maisons-Alfort, France

39. Anses (2019) Anses Opinion on the updating of the PNNS dietary guidelines for women from menopause and men over 65 years of age. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses)., Maisons-Alfort, France

40. Murray CJL, Lopez AD (2013) Measuring the Global Burden of Disease. N Engl J Med 369:448–457. https://doi.org/10.1056/NEJMra1201534

41. Kesse-Guyot E, Chaltiel D, Wang J, et al (2020) Sustainability analysis of French dietary guidelines using multiple criteria. Nat Sustain 3:377–385. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0495-8

42. Aune D, Giovannucci E, Boffetta P, et al (2017) Fruit and vegetable intake and the risk of cardiovascular disease, total cancer and all-cause mortality—a systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. International Journal of Epidemiology 46:1029–1056. https://doi.org/10.1093/ije/dyw319

43. Micha R, Peñalvo JL, Cudhea F, et al (2017) Association Between Dietary Factors and Mortality From Heart Disease, Stroke, and Type 2 Diabetes in the United States. JAMA 317:912. https://doi.org/10.1001/jama.2017.0947

44. Scarborough P, Harrington RA, Mizdrak A, et al (2014) The Preventable Risk Integrated ModEl and Its Use to Estimate the Health Impact of Public Health Policy Scenarios. Scientifica 2014:1–21. https://doi.org/10.1155/2014/748750

45. Inserm CépiDC Classification internationale des maladies (CIM). In: CépiDC Internet. https://www.cepidc.inserm.fr/causes-medicales-de-deces/classification-internationale-des-maladies-cim. Accessed 26 Feb 2019

46. Insee Évolution et structure de la population en 2014. In: Insee Internet. https://www.insee.fr/fr/statistiques/2862200. Accessed 26 Feb 2019

47. CépiDc (2019) Causes Médicales des Décès en 2014. https://www.cepidc.inserm.fr/causes-medicales-de-deces/interroger-les-donnees-de-mortalite . Accessed 26 Feb 2019

48. Thiébaut A, Kesse E, Com-Nougué C, et al (2004) Ajustement sur l'apport énergétique dans l'évaluation des facteurs de risque alimentaires. Revue d'Épidémiologie et de Santé Publique 52:539–557. https://doi.org/10.1016/S0398-7620(04)99093-1

49. Willett WC, Howe GR, Kushi LH (1997) Adjustment for total energy intake in epidemiologic studies. The American Journal of Clinical Nutrition 65:1220S-1228S. https://doi.org/10.1093/ajcn/65.4.1220S

50. Saltelli A, Ratto M, Andres T, et al (2008) Global Sensitivity Analysis: The Primer. John Wiley & Sons, Chichester

51. Adams J, White M (2015) Characterisation of UK diets according to degree of food processing and associations with socio-demographics and obesity: cross-sectional analysis of UK National Diet and Nutrition Survey (2008–12). Int J Behav Nutr Phys Act 12:160. https://doi.org/10.1186/s12966-015-0317-y

52. Julia C, Martinez L, Allès B, et al (2018) Contribution of ultra-processed foods in the diet of adults from the French NutriNet-Santé study. Public Health Nutr 21:27–37. https://doi.org/10.1017/S1368980017001367

53. Baraldi LG, Martinez Steele E, Canella DS, Monteiro CA (2018) Consumption of ultra-processed foods and associated sociodemographic factors in the USA between 2007 and 2012: evidence from a nationally representative cross-sectional study. BMJ Open 8:e020574. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-020574

54. Machado PP, Steele EM, Louzada ML da C, et al (2019) Ultra-processed food consumption drives excessive free sugar intake among all age groups in Australia. Eur J Nutr. https://doi.org/10.1007/s00394-019-02125-y

55. Baker P, Machado P, Santos T, et al (2020) Ultra-processed foods and the nutrition transition: Global, regional and national trends, food systems transformations and political economy drivers. Obesity Reviews 21:. https://doi.org/10.1111/obr.13126

56. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F (2018) Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. Nutrients 10:226. https://doi.org/10.3390/nu10020226

57. Gazan R, Béchaux C, Crépet A, et al (2016) Dietary patterns in the French adult population: a study from the second French national cross-sectional dietary survey (INCA2) (2006–2007). Br J Nutr 116:300–315. https://doi.org/10.1017/S0007114516001549

58. Louzada ML da C, Ricardo CZ, Steele EM, et al (2018) The share of ultra-processed foods determines the overall nutritional quality of diets in Brazil. Public Health Nutr 21:94–102. https://doi.org/10.1017/S1368980017001434

59. Martínez Steele E, Popkin BM, Swinburn B, Monteiro CA (2017) The share of ultra-processed foods and the overall nutritional quality of diets in the US: evidence from a nationally representative cross-sectional study. Popul Health Metrics 15:6. https://doi.org/10.1186/s12963-017-0119-3

60. Rauber F, Louzada ML da C, Martinez Steele E, et al (2019) Ultra-processed foods and excessive free sugar intake in the UK: a nationally representative cross-sectional study. BMJ Open 9:e027546. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2018-027546

61. Rauber F, Chang K, Vamos EP, et al (2020) Ultra-processed food consumption and risk of obesity: a prospective cohort study of UK Biobank. Eur J Nutr. https://doi.org/10.1007/s00394-020-02367-1

62. Salas-Salvadó J, Becerra-Tomás N, García-Gavilán JF, et al (2018) Mediterranean Diet and Cardiovascular Disease Prevention: What Do We Know? Prog Cardiovasc Dis 61:62–67. https://doi.org/10.1016/j.pcad.2018.04.006

63. Anand SS (2015) Food Consumption and its Impact on Cardiovascular Disease: Importance of Solutions Focused on the Globalized Food System: A Report From the Workshop Convened by the World Heart Federation. Cardiovascular Disease 66:25

64. Petersen KS, Flock MR, Richter CK, et al (2017) Healthy Dietary Patterns for Preventing Cardiometabolic Disease: The Role of Plant-Based Foods and Animal Products. Curr Dev Nutr 1:cdn.117.001289. https://doi.org/10.3945/cdn.117.001289

65. Kim H, Caulfield LE, Garcia-Larsen V, et al (2019) Plant-Based Diets Are Associated With a Lower Risk of Incident Cardiovascular Disease, Cardiovascular Disease Mortality, and All-Cause Mortality in a General Population of Middle-Aged Adults. JAHA 8:. https://doi.org/10.1161/JAHA.119.012865

66. Springmann M, Wiebe K, Mason-D'Croz D, et al (2018) Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: a global modelling analysis with country-level detail. The Lancet Planetary Health 2:e451–e461. https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30206-7

67. Tian S, Xu Q, Jiang R, et al (2017) Dietary Protein Consumption and the Risk of Type 2 Diabetes: A Systematic Review and Meta-Analysis of Cohort Studies. Nutrients 9:982. https://doi.org/10.3390/nu9090982

68. Sanchez-Sabate R, Badilla-Briones Y, Sabaté J (2019) Understanding Attitudes towards Reducing Meat Consumption for Environmental Reasons. A Qualitative Synthesis Review. Sustainability 11:6295. https://doi.org/10.3390/su11226295

69. Malek L, Umberger WJ, Goddard E (2019) Committed vs. uncommitted meat eaters: Understanding willingness to change protein consumption. Appetite 138:115–126. https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.03.024

Supplementary data

European Journal of Nutrition

Contrary to ultra-processed foods, the consumption of unprocessed or minimally processed foods is associated with favorable patterns of protein intake, diet quality and lower cardiometabolic risk in French adults (INCA3).

Marion Salomé[1], Laura Arrazat[1], Juhui Wang[1], Ariane Dufour[2], Carine Dubuisson[2], Jean-Luc Volatier[2], Jean-François Huneau[1], François Mariotti[1]*

[1]Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France
[2]Risk Assessment Department, Methodology and Survey Unit, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES), 14 rue Pierre et Marie Curie, 94701 Maisons-Alfort Cedex, France

* Corresponding author: François Mariotti, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France, francois.mariotti@agroparistech.fr

Supplementary Table S1 Reference values of the PANDiet scoring system.

PANDiet score[1]
Average of Adequacy and Moderation subscores

Adequacy subscore			
Nutrient	**Reference value (/day)[2]**	**Variability**	**Source**
Protein	0.66 or 0.8 g/kg bw	12.5%	**[1]**
LA	3.08% EIEA	15%	**[3]**
ALA	0.769% EIEA	15%	**[3]**
DHA	0.192 g	15%	**[3]**
EPA + DHA	0.385 g	15%	**[3]**
Fiber	23 g	15%	**[2]**
Vitamin A	570 or 490 µg	15%	**[2]**
Thiamin	0.3 mg/1000 kcal	20%	**[4]**
Riboflavin	1.3 mg	15%	**[4]**
Niacin	5.44 mg NE/1000kcal	10%	**[2]**
Pantothenic acid	3.62 or 2.94 mg	30%	**[2]**
Vitamin B-6	1.5 or 1.3 mg	10%	**[5]**
Folate	250 µg	15%	**[2]**
Vitamin B-12	3.33 µg	10%	**[2]**
Vitamin C	90 mg	10%	**[2]**
Vitamin D	10 µg	25%	**[2]**
Vitamin E	5.8 or 5.5 mg	40%	**[2]**
Calcium	860 (<= 24 y.o) or 750 (>24 y.o.)	15% or 13%	**[2]**
Copper	1.0 or 0.8 mg	15%	**[2]**
Iodine	107 µg	20%	**[2]**
Bioavailable iron	See formula in de Gavelle et al. (7)		**[2]**
Magnesium	5 mg/kg bw	15%	**[2]**
Manganese	1.56 or 1.39 mg	40%	**[2]**
Phosphorus	Calcium (mmol) / 1.65 c.f. phosphorus section in de Gavelle et al. **[6]**	7.5% + CV Calcium (mg)	**[4]**
Potassium	2692 mg	15%	**[4]**
Selenium	54 µg	15%	**[2]**
Bioavailable zinc	0.642 + 0.038 b.w.	10%	**[2]**

Moderation subscore			
Nutrient	**Reference value (/day)**	**Variability**	**Source**
Protein	2.2 g/kg bw	12.5%	**[2]**
Total fat	44% EIEA	5%	**[2]**
SFA	12% EIEA	15%	**[2]**
Carbohydrates	60.5% EIEA	5%	**[2]**
Sugars (without lactose)	100 g	15%	**[2]**
Sodium	3482 or 2618 mg	40%	**[2]**

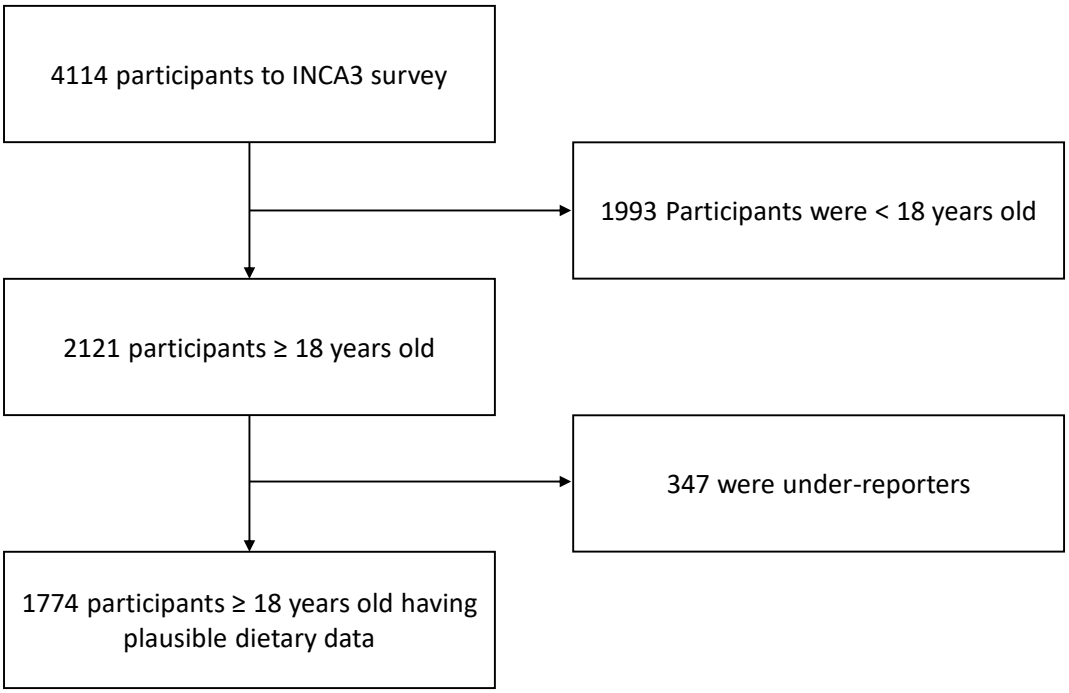
Tolerable Upper Intake Limits		Source
Vitamin A (retinol only)	3000 µg	**[2]**
Niacin	900 mg	**[2]**
Vitamin B6	25 mg	**[2]**
Folate	1170 µg	**[2]**
Vitamin D	100 µg	**[2]**
Vitamin E	300 mg	**[2]**
Calcium	2500 mg	**[2]**
Copper	10 mg	**[2]**
Iodine	600 µg	**[2]**
Dissociable magnesium	250 mg	**[2]**
Selenium	300 µg	**[2]**
Zinc	25 mg	**[2]**

[1]The PANDiet score is expressed as the average of an adequacy subscore (AS – accounting for 27 nutrients) and a moderation subscore (MS – accounting for six nutrients, plus 12 potential penalty values). DHA and EPA+DHA are weighted by a factor of 1/2 as DHA is present twice. Niacin equivalents were calculated as the sum of dietary niacin and 1/60 dietary tryptophan. The complete construction of the score has been described elsewhere [7, 8].
[2]The PANDiet 3.1 version is mainly based on the dietary reference intake from the 2016 Anses opinion [2]. PANDiet was modified from its previous version [8] in order to be used also in older adults [9]. According to ANSES opinion, the reference values for vitamins and minerals and the contribution of macronutrients to energy intake are similar to those of adults. Only protein intake should be higher (with a population reference intake of 1 g/kg/d vs 0.83 g/kg/d for younger adults). The reference value for proteins was therefore adapted for adults over the age of 65y.
ALA, alpha-linolenic acid; bw, body weight; CV, coefficient of variation; DHA, docosahexaenoic acid; EIEA, energy intake excluding alcohol; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; NE, niacin equivalent; SFA, saturated fatty acids.

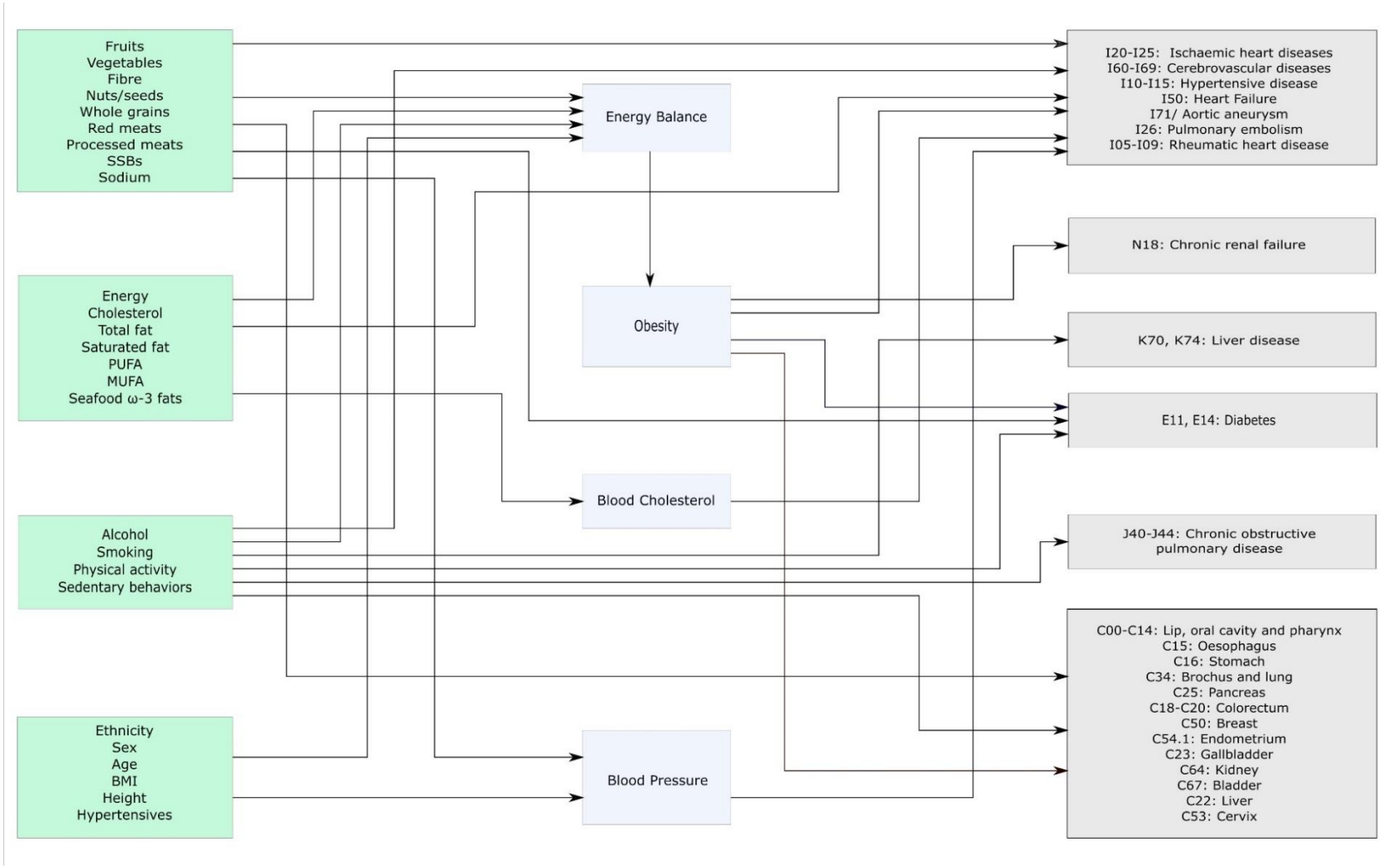
Supplementary Table S2 Food groups used to calculate PDI scores, and scoring system, as proposed by Satija et al. [10, 11]

	Overall plant-based diet index (PDI) (18-90 points)	**Healthy plant-based diet index (hPDI) (18-90 points)**	**Unhealthy plant-based diet index (uPDI) (18-90 points)**
	Plant Food Groups[1]		
Healthy			
Whole grains	Positive scores[2]	Positive scores	Reverse scores[3]
Fruits	Positive scores	Positive scores	Reverse scores
Vegetables	Positive scores	Positive scores	Reverse scores
Nuts	Positive scores	Positive scores	Reverse scores
Legumes	Positive scores	Positive scores	Reverse scores
Vegetable oils	Positive scores	Positive scores	Reverse scores
Tea and coffee	Positive scores	Positive scores	Reverse scores
Less healthy			
Fruit juices	Positive scores	Reverse scores	Positive scores
Refined grains	Positive scores	Reverse scores	Positive scores
Potatoes	Positive scores	Reverse scores	Positive scores
Sugar sweetened beverages	Positive scores	Reverse scores	Positive scores
Sweets and desserts	Positive scores	Reverse scores	Positive scores
	Animal Food Groups		
Animal fats	Reverse scores	Reverse scores	Reverse scores
Dairy	Reverse scores	Reverse scores	Reverse scores
Eggs	Reverse scores	Reverse scores	Reverse scores
Fish or seafood	Reverse scores	Reverse scores	Reverse scores
Meat	Reverse scores	Reverse scores	Reverse scores
Miscellaneous animal-based foods	Reverse scores	Reverse scores	Reverse scores

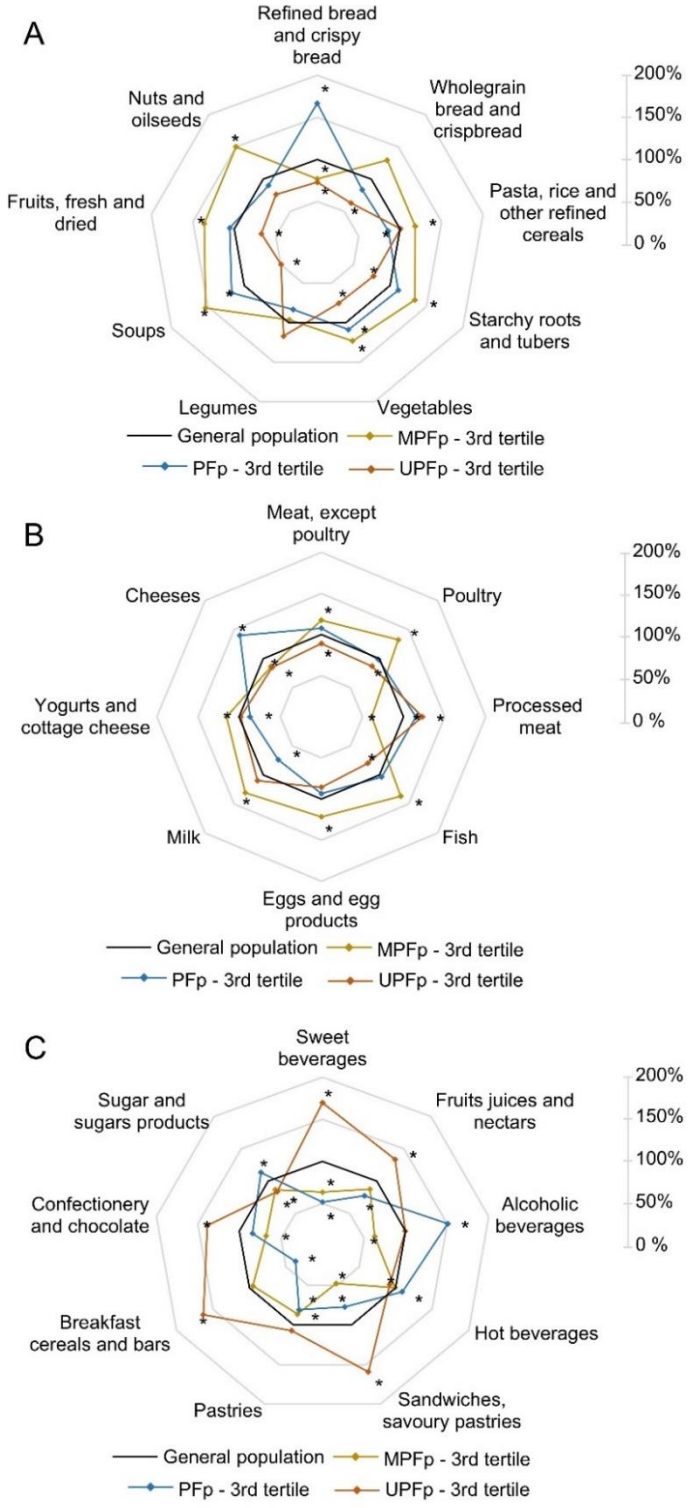
[1]Each food item was attributed to a food group (mixed foods were broken down into ingredients which were then attributed to a food group). The mean quantity of each food group consumed each day per individual was worked out instead of the frequencies of consumption, because our data came from 24h recalls and not a FFQ, as was the case in the study by Satija et al. The consumption of each food group was stratified into quintiles among participants. For each food group, a score between 1 and 5 was applied.
[2]For positive scores, the highest scores were attributed to the individuals in the highest consumption quintiles (i.e. 5 points for the 5th quintile to 1 point for the 1st quintile).
[3]For reverse scores, individuals in the higher quintiles received fewer points that individuals in the lower quintiles (i.e. 1 point for the 5th quintile to 5 point for the 1st quintile).



Supplementary Figure S1 Flow chart explaining the sampling of French participants from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3).



Supplementary Figure S2 A conceptual framework showing the relationship between the risk factors and the disease outcomes, implemented in the EpiDiet model. The left column lists the risk factors considered (foods, macro and micro-nutrients, behaviors and anthropometric measurements), and the right the diseases taken into account in the model. In the middle are listed the mechanistic or statistical models implemented in EpiDiet to formulate the hypotheses on the mediator factors.



Supplementary Figure S3 Relative mean intake of A. Plant-based food groups, B. Animal-based food groups and C. Miscellaneous food groups in the third tertiles of the proportion of unprocessed/minimally processed foods in the diet (MPFp-3rd tertile, n=591), the proportion of processed foods in the diet (PFp-3rd tertile, n=591) and the proportion of ultra-processed foods in the diet (UPFp-3rd tertile, n=591) shown as a percentage compared to ls-mean intake in the INCA3 population (n=1774), taken as the reference at 100%. Means are adjusted for the season of recall. * indicates significant difference vs. the general population. Between-subject variability is not shown for the sake of clarity.

Supplementary Table S3 Contingency table showing the frequency distribution (across tertiles) of the proportion of energy from unprocessed/minimally processed foods (MPF), processed foods (PF) and ultra-processed foods (UPF) in the diet of the French adult population[a].

			Proportion of total energy intake from PF			Proportion of total energy intake from UPF		
			Tertile 1 (n=591)	Tertile 2 (n=592)	Tertile 3 (n=591)	Tertile 1 (n=591)	Tertile 2 (n=592)	Tertile 3 (n=591)
Proportion of total energy intake from MPF	Tertile 1 (n=591)	n	136	186	269	87	150	354
		%	*7.67*	*10.48*	*15.16*	*4.9*	*8.46*	*19.95*
	Tertile 2 (n=592)	n	168	193	231	181	235	176
		%	*9.47*	*10.88*	*13.02*	*10.2*	*13.25*	*9.92*
	Tertile 3 (n=591)	n	287	213	91	323	207	61
		%	*16.18*	*12.01*	*5.13*	*18.21*	*11.67*	*3.44*
Proportion of total energy intake from UPF	Tertile 1 (n=591)	n	103	169	319			
		%	*5.81*	*9.53*	*17.98*			
	Tertile 2 (n=592)	n	173	222	197			
		%	*9.75*	*12.51*	*11.1*			
	Tertile 3 (n=591)	n	315	201	75			
		%	*17.76*	*11.33*	*4.23*			

[a]Data from the Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n*=1774. MPF, unprocessed/minimally processed foods; PF, processed foods; UPF, ultra-processed foods.

Supplementary Table S4 Sociodemographic characteristics according to tertiles of the proportion of unprocessed/minimally processed foods (MPF), processed foods (PF) and ultra-processed foods (UPF) in the diet of the French adult population[a].

	All population (n=1774)	Proportion of total energy intake from MPF				Proportion of total energy intake from PF				Proportion of total energy intake from UPF			
		T1 (n=591) 1.01-27.66%	T2 (n=592) 27.67-37.68%	T3 (n=591) 37.69-76.91%	*P*[*]	T1 (n=591) 0.00-19.58%	T2 (n=592) 19.59-30.21%	T3 (n=591) 30.22-69.47%	*P*	T1 (n=591) 0.12-20.62%	T2 (n=592) 20.68-34.06%	T3 (n=591) 34.13-78.92%	*P*
Sex, *% males*	49.9	56.6	48.9	43.0	<0.001	40.1	48.0	62.2	<0.001	48.5	49.5	51.4	0.603
Age group, *%*					<0.001				<0.001				<0.001
18-24 y	10.3	13.7	7.8	8.9		19.2	5.4	5.8		4.6	3.6	20.5	
25-34 y	15.9	23.4	12.5	10.5		20.9	15.1	11.5		4.1	15.2	25.7	
35-49 y	30.7	33.5	30.5	27.5		28.1	38.6	25.6		23.7	33.6	33.7	
50-65 y	25.8	20.3	30.1	27.9		21.0	23.1	33.6		34.4	32.0	13.8	
65-79 y	17.4	9.1	19.1	25.3		10.9	17.9	23.6		33.4	15.6	6.3	
Educational level, *%*					0.417				0.014				<0.001
Primary school	47.0	44.7	47.0	49.7		44.0	44.9	52.1		53.2	47.2	42.0	
Middle school	17.7	17.0	18.3	17.8		21.5	16.9	14.4		15.8	13.2	23.0	
Secondary school	17.4	19.3	17.8	14.7		16.8	18.1	17.3		14.7	18.8	18.3	
College or university	18.0	18.9	17.0	17.9		17.7	20.0	16.2		16.4	20.9	16.7	
Occupational status, *%*					<0.001				<0.001				<0.001
Employee	15.6	16.9	15.7	13.9		22.9	10.5	13.1		10.0	16.5	19.3	
Manual worker	13.1	14.8	14.1	9.8		13.6	15.1	10.5		7.0	13.1	17.8	
Farmer	0.7	0.6	0.6	0.9		0.1	1.0	0.9		1.0	0.9	0.2	
Craftsman, shopkeeper, business owner	3.3	3.1	3.4	3.5		2.4	2.5	5.2		4.4	4.3	1.7	
Intermediate profession	19.6	22.7	19.3	16.2		16.9	25.3	16.8		12.9	19.8	24.7	
Professional, executive	13.2	14.9	13.5	10.8		10.8	14.2	14.7		12.8	14.8	12.1	
Retired	23.1	13.8	25.7	31.6		14.9	22.5	32.4		44.3	20.5	8.8	
Inactive	11.4	13.1	7.7	13.3		18.5	9.1	6.4		7.6	10.2	15.5	
Region of France, *%*					0.001				0.005				0.238
Ile-de-France (Paris area)	17.4	16.0	16.3	20.4		18.4	15.7	18.1		17.9	19.1	15.6	
North-West	19.8	22.3	22.3	14.3		17.3	21.9	20.4		17.8	19.9	21.4	
North-East	27.2	26.8	29.9	24.7		28.5	30.5	22.5		24.8	28.5	27.9	
South-East	17.9	19.0	15.2	19.4		19.2	13.6	20.8		19.8	17.2	17.0	
South-West	17.7	16.0	16.3	21.3		16.6	18.3	18.3		19.7	15.3	18.2	
City size, *%*					<0.001				<0.001				<0.001
Rural	26.1	20.3	31.1	27.7		22.4	25.8	30.3		31.4	28.4	20.0	
2 000-19 999 hab.	17.6	19.8	18.5	14.0		15.5	16.0	21.4		19.0	17.8	16.3	
20 000-99 999 hab.	11.0	9.7	14.0	9.2		12.4	9.5	10.9		11.1	9.3	12.2	
≥100 000 hab.	32.4	37.1	27.0	32.6		33.5	36.9	26.8		25.9	31.7	38.1	
Paris agglomeration	13.0	13.1	9.5	16.5		16.3	11.8	10.7		12.6	12.8	13.4	

[a] Data from the Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, *n*=1774. Values are percentages weighted for the survey design.
[*] *P* values are from χ^2 test. NS. "Refusals to answer" were included in the statistical test (for Matrimonial status and Perception of financial status)
MPF, unprocessed/minimally processed foods; NS, nonsignificant; PF, processed foods; T, tertile; UPF, ultra-processed foods; y, years old

Supplementary Table S4 (continued)

	All population (n=1774)	Proportion of total energy intake from MPF				Proportion of total energy intake from PF				Proportion of total energy intake from UPF			
		T1 (n=591) 1.01-27.66%	T2 (n=592) 27.67-37.68%	T3 (n=591) 37.69-76.91%	*P*	T1 (n=591) 0.00-19.58%	T2 (n=592) 19.59-30.21%	T3 (n=591) 30.22-69.47%	*P*	T1 (n=591) 0.12-20.62%	T2 (n=592) 20.68-34.06%	T3 (n=591) 34.13-78.92%	*P*
Season of record, *%*					<0.001				<0.001				0.417
Winter	24.5	20.8	21.9	31.8		32.5	22.0	18.7		25.2	24.3	24.1	
Spring	25.0	28.4	23.5	22.7		21.7	26.0	27.7		25.6	25.7	24.0	
Summer	25.6	30.4	25.5	19.9		22.7	27.3	26.9		23.5	23.8	28.7	
Autumn	24.9	20.5	29.2	25.6		23.2	24.8	26.8		25.7	26.2	23.1	
Matrimonial status, *%*					<0.001				<0.001				<0.001
Single	20.3	22.4	19.3	19.0		29.3	14.7	16.6		12.8	15.3	30.6	
Married	48.9	42.4	49.4	56.2		38.5	52.2	56.6		63.5	56.3	31.2	
Unmarried couple	19.3	24.9	20.8	11.0		20.2	20.0	17.7		11.5	17.8	26.7	
Widowed	3.5	2.6	3.3	4.7		3.6	3.1	3.7		4.5	3.3	2.8	
Separated/divorced	8.0	7.7	7.3	8.9		8.4	10.2	5.3		7.7	7.3	8.8	
Refusal to answer	0.0	0.0	0.0	0.1		0.0	0.0	0.1		0.1	0.0	0.0	
Perception of financial status, *%*					0.002				0.183				0.027
Financially comfortable	14.7	14.5	15.2	14.4		14.5	15.0	14.7		15.0	16.0	13.4	
It's okay	36.2	33.0	38.5	37.7		35.2	34.4	39.1		39.8	37.2	32.6	
It's tight	10.8	9.3	10.3	13.2		10.7	12.0	9.8		12.0	9.7	10.8	
Manageable if careful	29.5	31.3	31.1	25.5		29.4	30.3	28.7		27.3	28.7	31.8	
Hard to make ends meet	7.9	10.5	4.4	8.4		8.5	7.9	7.3		5.2	7.9	10.0	
Can't manage without debts	0.9	1.4	0.5	0.8		1.9	0.3	0.4		0.6	0.5	1.4	
Refusal to answer	0.0	0.0	0.1	0.0		0.0	0.1	0.0		0.1	0.0	0.0	
Food insufficiency, *%*					0.005				0.106				<0.001
Food sufficiency	83.2	79.0	85.5	85.9		80.7	83.8	85.2		87.1	84.7	78.9	
Qualitative food insufficiency	14.2	18.2	11.6	12.0		17.1	13.5	11.7		11.6	10.8	19.0	
Quantitative food insufficiency	2.6	2.8	2.9	2.1		2.3	2.6	3.0		1.4	4.5	2.0	
Food insecurity, *%*					<0.001				0.032				<0.001
Food security	92.1	87.1	96.7	93.2		90.3	91.5	94.5		95.3	94.1	87.9	
Moderate food insecurity	4.9	8.4	1.6	4.0		5.4	6.0	3.1		2.5	3.8	7.6	
Severe food insecurity	3.1	4.4	1.7	2.8		4.3	2.5	2.4		2.2	2.1	4.6	
Body Mass Index (BMI), %													
Underweight (BMI<18.5)	3.5	4.0	4.7	1.7	0.005	5.1	3.3	2.2	0.005	2.4	3.4	4.5	0.013
Normal weight (18.5≤BMI<25)	48.6	50.4	50.9	44.0		52.8	44.7	48.0		44.3	49.1	51.6	
Overweight (25≤BMI<30)	34.8	33.9	32.2	38.6		31.5	37.1	36.0		36.9	34.4	33.4	
Obesity (BMI≥30)	13.1	11.7	12.3	15.7		10.6	15.0	13.8		16.5	13.1	10.5	
BMI, kg/m² (mean ± SD)	25.3 ± 4.4	25.1 ± 4.5	25.1 ± 4.4	25.8 ± 4.4		24.6 ± 4.7	25.8 ± 4.4	25.5 ± 4.1		25.8 ± 4.7	25.3 ± 4.2	24.8 ± 4.8	

Supplementary Table S5 Total, plant and animal protein intakes and distribution of food families to animal or plant protein intake according to tertiles of the proportion of unprocessed/minimally processed foods (MPF), processed foods (PF) and ultra-processed foods (UPF) in the diet of the French adult population[a].

	All population (n=1774)		Proportion of total energy intake from MPF						Proportion of total energy intake from PF						Proportion of total energy intake from UPF					
			T1 (n=591) 1.01-27.66%		T2 (n=592) 27.67-37.68%		T3 (n=591) 37.69-76.91%		T1 (n=591) 0.00-19.58%		T2 (n=592) 19.59-30.21%		T3 (n=591) 30.22-69.47%		T1 (n=591) 0.12-20.62%		T2 (n=592) 20.68-34.06%		T3 (n=591) 34.13-78.92%	
	Mean	SEM	Mean[b]	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM
Total protein, g/d	81.7	0.4	76.8	0.7	81.8**	0.7	87.4**	0.7	78.7	0.7	82.2**	0.7	84.2**	0.7	83.3	0.8	82.7	0.7	79.4**	0.7
Animal protein, g/d	55.7	0.5	51.1	0.7	55.8**	0.8	61.0**	0.8	55.0	0.8	57.0	0.8	55.2	0.8	54.9	0.8	56.9	0.8	55.3	0.7
BI-APF	0.73	0.00	0.73	0.00	0.73	0.00	0.71**	0.00	0.72	0.00	0.73	0.00	0.72	0.00	0.71	0.00	0.73*	0.00	0.73**	0.00
Protein from animal-based families, % of animal protein																				
Red meat	24.2	0.5	21.3	0.7	25.3**	0.8	26.5**	0.8	24.8	0.8	24.3	0.8	23.4	0.8	24.2	0.8	25.1	0.8	23.3	0.7
Poultry	13.1	0.4	10.8	0.6	12.4	0.7	16.6**	0.7	14.3	0.6	12.3*	0.7	12.7	0.7	14.6	0.7	13.1	0.7	11.9*	0.6
Processed meat	12.2	0.3	16.9	0.4	11.5**	0.5	7.4**	0.5	10.9	0.5	12.6*	0.5	13.2**	0.5	9.8	0.5	10.9	0.5	15.2**	0.4
Fish	10.9	0.3	7.8	0.5	12.2**	0.6	13.3**	0.6	10.7	0.6	10.8	0.6	11.3	0.6	12.2	0.6	12.3	0.6	8.7**	0.5
Eggs	6.1	0.2	6.3	0.2	6.0	0.3	6.0	0.3	7.1	0.3	6.0*	0.3	5.1**	0.3	6.2	0.3	6.0	0.3	6.1	0.2
Milk	8.8	0.2	9.6	0.4	7.9*	0.4	8.6	0.4	11.2	0.4	8.8**	0.4	6.2**	0.4	6.6	0.4	7.7*	0.4	11.3**	0.4
Cheese	16.3	0.3	19.9	0.5	16.4**	0.5	11.8**	0.5	12.0	0.5	16.6**	0.5	20.4**	0.5	17.4	0.5	15.6*	0.5	15.8*	0.5
Yogurt	6.0	0.2	5.3	0.3	5.8	0.3	7.2**	0.3	7.0	0.3	6.1*	0.3	5.0**	0.3	6.1	0.3	6.7	0.3	5.4	0.3
Offal	1.1	0.1	1.0	0.2	1.2	0.2	1.2	0.2	0.7	0.2	1.3*	0.2	1.4*	0.2	1.4	0.2	1.1	0.2	0.9*	0.2
Game	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.5**	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5*	0.1	0.6	0.1	0.2**	0.1	0.0**	0.1
Other dairy products	1.1	0.0	1.1	0.1	1.2	0.1	0.9*	0.1	1.2	0.1	1.1	0.1	0.9*	0.1	0.9	0.1	1.1*	0.1	1.1*	0.1
Plant protein, g/d	26.0	0.1	25.7	0.2	25.9	0.2	26.4*	0.3	23.7	0.2	25.3**	0.2	29.0**	0.2	28.4	0.2	25.8**	0.2	24.1**	0.2
Plant protein, % of total protein	33.2	0.2	35.0	0.4	33.0**	0.4	31.2**	0.4	31.7	0.4	32.2	0.4	35.7**	0.4	35.3	0.4	32.4**	0.4	32.2**	0.4
BI-PBF	0.59	0.00	0.55	0.01	0.60**	0.01	0.64**	0.01	0.64	0.01	0.61**	0.01	0.53**	0.01	0.58	0.01	0.61*	0.01	0.59	0.01
Protein from plant-based families, % of plant protein																				
Refined grains	55.0	0.4	60.7	0.7	55.7**	0.7	47.3**	0.7	48.8	0.7	54.1**	0.7	62.2**	0.7	54.8	0.8	53.6	0.8	56.1	0.7
Whole grains	5.3	0.2	4.1	0.4	5.6*	0.4	6.4**	0.4	5.7	0.4	5.9	0.4	4.3*	0.4	5.7	0.4	5.9	0.4	4.5*	0.4
Nuts and seeds	3.1	0.1	2.5	0.2	3.2*	0.2	3.8**	0.3	3.5	0.2	3.2	0.2	2.6*	0.2	3.1	0.3	3.4	0.2	2.9	0.2
Legumes	2.8	0.2	2.4	0.3	2.9	0.3	3.1	0.3	3.3	0.3	2.7	0.3	2.3*	0.3	2.5	0.3	3.0	0.3	2.9	0.3
Vegetables	12.6	0.2	9.4	0.3	12.4**	0.3	16.6**	0.3	13.6	0.3	12.6*	0.4	11.4**	0.4	14.9	0.4	12.6**	0.3	10.8**	0.3
Potatoes	7.1	0.2	6.1	0.3	6.7	0.3	8.7**	0.3	7.8	0.3	7.4	0.3	6.0**	0.3	7.5	0.3	7.4	0.3	6.5*	0.3
Fruits	5.9	0.1	4.6	0.2	5.8**	0.2	7.4**	0.2	6.9	0.2	5.7**	0.2	5.0**	0.2	6.3	0.2	6.1	0.2	5.3**	0.2
Other plant foods	8.3	0.2	10.3	0.3	7.7**	0.3	6.7**	0.3	10.3	0.3	8.3**	0.3	6.2**	0.3	5.1	0.3	8.0**	0.3	11.1**	0.2

[a] Data from the Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, n=1774. Data were collected by three 24h recalls.
[b] Means adjusted for season of recall and weighted for the survey design. Significantly different from the mean of the first tertile: *, P<0.05; **, P<0.001; *P* ≥ 0.05, NS. P for ANOVA tests adjusted for season of recall.
BI-ABF: Berry-Index Animal-based families; BI-PBF: Berry-Index Plant-based families; MPF, unprocessed/minimally processed foods; NS, nonsignificant; PF, processed foods; SEM: standard error of the mean; T, tertile; UPF, ultra-processed foods.

Supplementary Table S6 PANDiet score and subscores and plant-based diet indices according to tertiles of the proportion of unprocessed/minimally processed foods (MPF), processed foods (PF) and ultra-processed foods (UPF) in the diet of the French adult population[a].

	All population (n=1774)		Proportion of total energy intake from MPF						Proportion of total energy intake from PF						Proportion of total energy intake from UPF					
			T1 (n=591) 1.01-27.66%		T2 (n=592) 27.67-37.68%		T3 (n=591) 37.69-76.91%		T1 (n=591) 0.00-19.58%		T2 (n=592) 19.59-30.21%		T3 (n=591) 30.22-69.47%		T1 (n=591) 0.12-20.62%		T2 (n=592) 20.68-34.06%		T3 (n=591) 34.13-78.92%	
	Mean	SEM	Mean[b]	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM	Mean[2]	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM	Mean[2]	SEM	Mean	SEM	Mean	SEM
PANDiet score (0-100)	64.3	0.14	62.6	0.22	64.5**	0.24	66.2**	0.24	63.5	0.24	64.2*	0.24	65.3**	0.24	65.3	0.25	65.0	0.24	62.9**	0.22
AS (0-100)	63.6	0.31	62.2	0.51	64.7*	0.54	64.2*	0.56	61.6	0.53	64.0*	0.54	65.4**	0.54	64.7	0.57	64.1	0.54	62.3*	0.50
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)																				
Protein	0.89	0.00	0.89	0.01	0.91	0.01	0.87	0.01	0.86	0.01	0.89*	0.01	0.92**	0.01	0.87	0.01	0.90*	0.01	0.90*	0.01
LA	0.43	0.01	0.46	0.01	0.41*	0.01	0.42*	0.01	0.49	0.01	0.46	0.01	0.34**	0.01	0.34	0.01	0.45**	0.01	0.48**	0.01
ALA	0.11	0.00	0.11	0.01	0.11	0.01	0.11	0.01	0.13	0.01	0.10*	0.01	0.09*	0.01	0.10	0.01	0.12	0.01	0.10	0.01
DHA	0.22	0.01	0.15	0.01	0.25**	0.01	0.28**	0.01	0.22	0.01	0.23	0.01	0.23	0.01	0.25	0.01	0.23	0.01	0.19*	0.01
EPA+DHA	0.20	0.01	0.14	0.01	0.22**	0.01	0.25**	0.01	0.19	0.01	0.20	0.01	0.20	0.01	0.22	0.01	0.21	0.01	0.17*	0.01
Fiber	0.39	0.01	0.37	0.01	0.40	0.01	0.41	0.01	0.35	0.01	0.38*	0.01	0.45**	0.01	0.46	0.01	0.38**	0.01	0.34**	0.01
Vitamin A	0.52	0.01	0.49	0.01	0.56*	0.01	0.51	0.01	0.46	0.01	0.53**	0.01	0.56**	0.01	0.60	0.01	0.51**	0.01	0.47**	0.01
Thiamin	0.96	0.00	0.96	0.00	0.96	0.00	0.97**	0.00	0.96	0.00	0.97*	0.00	0.97*	0.00	0.96	0.00	0.97	0.00	0.96	0.00
Riboflavin	0.76	0.01	0.75	0.01	0.78	0.01	0.75	0.01	0.71	0.01	0.77**	0.01	0.80**	0.01	0.77	0.01	0.77	0.01	0.75	0.01
Niacin	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00*	0.00	1.00*	0.00	0.99	0.00	1.00**	0.00	1.00**	0.00	1.00	0.00	1.00*	0.00	1.00	0.00
Pantothenic acid	0.87	0.00	0.85	0.01	0.89**	0.01	0.88*	0.01	0.84	0.01	0.88**	0.01	0.89**	0.01	0.87	0.01	0.88	0.01	0.86	0.01
Vitamin B-6	0.69	0.01	0.64	0.01	0.71**	0.01	0.74**	0.01	0.65	0.01	0.69*	0.01	0.73**	0.01	0.73	0.01	0.71	0.01	0.64**	0.01
Folate	0.66	0.01	0.61	0.01	0.70**	0.01	0.69**	0.01	0.63	0.01	0.66	0.01	0.70**	0.01	0.72	0.01	0.68*	0.01	0.61**	0.01
Vitamin B-12	0.65	0.01	0.62	0.01	0.66*	0.01	0.67*	0.01	0.61	0.01	0.65*	0.01	0.69**	0.01	0.66	0.01	0.66	0.01	0.63	0.01
Vitamin C	0.43	0.01	0.34	0.01	0.44**	0.02	0.52**	0.02	0.43	0.02	0.45	0.02	0.39	0.02	0.49	0.02	0.43*	0.02	0.37**	0.01
Vitamin D	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00
Vitamin E	0.80	0.00	0.81	0.01	0.80	0.01	0.79	0.01	0.80	0.01	0.81	0.01	0.79	0.01	0.78	0.01	0.81*	0.01	0.81*	0.01
Iodine	0.72	0.01	0.71	0.01	0.72	0.01	0.74*	0.01	0.69	0.01	0.73*	0.01	0.75**	0.01	0.75	0.01	0.72	0.01	0.70*	0.01
Magnesium	0.48	0.01	0.48	0.01	0.50	0.01	0.48	0.01	0.47	0.01	0.45	0.01	0.53*	0.01	0.48	0.01	0.49	0.01	0.48	0.01
Phosphorus	0.97	0.00	0.96	0.00	0.98**	0.00	0.97**	0.00	0.96	0.00	0.98**	0.00	0.98**	0.00	0.97	0.00	0.98	0.00	0.96**	0.00
Potassium	0.66	0.01	0.64	0.01	0.68*	0.01	0.67*	0.01	0.61	0.01	0.66*	0.01	0.71**	0.01	0.70	0.01	0.67	0.01	0.62**	0.01
Selenium	0.95	0.00	0.93	0.00	0.95*	0.00	0.95*	0.00	0.94	0.00	0.95	0.00	0.95	0.00	0.94	0.00	0.95	0.00	0.94	0.00
Absorbed zinc	0.29	0.01	0.29	0.01	0.30	0.01	0.27	0.01	0.30	0.01	0.28	0.01	0.29	0.01	0.26	0.01	0.27	0.01	0.33**	0.01
Copper	0.91	0.00	0.91	0.01	0.92	0.01	0.89	0.01	0.88	0.01	0.91**	0.01	0.93**	0.01	0.91	0.01	0.91	0.01	0.90	0.01
Manganese	0.90	0.00	0.90	0.01	0.92	0.01	0.89*	0.01	0.87	0.01	0.91**	0.01	0.93**	0.01	0.91	0.01	0.91	0.01	0.89*	0.01
Calcium	0.64	0.01	0.67	0.01	0.64	0.01	0.60*	0.01	0.59	0.01	0.66**	0.01	0.66**	0.01	0.63	0.01	0.64	0.01	0.64	0.01
Absorbed iron	0.61	0.01	0.61	0.01	0.63	0.01	0.59	0.01	0.56	0.01	0.61**	0.01	0.68**	0.01	0.63	0.01	0.61	0.01	0.60*	0.01
MS (0-100)	65.0	0.23	63.0	0.37	64.3*	0.40	68.1**	0.41	65.4	0.39	64.5	0.40	65.2	0.40	66.0	0.42	65.9	0.40	63.5**	0.37
Probabilities of adequacy for MS components (0-1)																				
Protein	0.94	0.00	0.93	0.01	0.94	0.01	0.94	0.01	0.93	0.01	0.95	0.01	0.92	0.01	0.93	0.01	0.95	0.01	0.93	0.01
Carbohydrates	0.94	0.00	0.93	0.00	0.94	0.01	0.95*	0.01	0.94	0.00	0.97**	0.01	0.92**	0.01	0.92	0.01	0.95**	0.01	0.95**	0.00
Total fat	0.92	0.00	0.92	0.01	0.91	0.01	0.92	0.01	0.91	0.01	0.90	0.01	0.94**	0.01	0.93	0.01	0.91*	0.01	0.92	0.01
SFA	0.30	0.01	0.27	0.01	0.27	0.01	0.35**	0.01	0.32	0.01	0.24**	0.01	0.33	0.01	0.35	0.01	0.28**	0.01	0.26**	0.01
Sugars (without lactose)	0.65	0.01	0.61	0.01	0.65	0.01	0.71**	0.01	0.59	0.01	0.66**	0.01	0.71**	0.01	0.69	0.01	0.69	0.01	0.59**	0.01
Sodium	0.18	0.00	0.15	0.01	0.16	0.01	0.24**	0.01	0.26	0.01	0.16**	0.01	0.12**	0.01	0.17	0.01	0.19	0.01	0.19	0.01
PDI (18-90)	52.1	0.14	51.3	0.24	51.9	0.25	53.5**	0.26	52.1	0.25	51.9	0.25	52.4	0.25	53.5	0.26	52.1**	0.25	51.1**	0.23
hPDI (18-90)	52.4	0.16	51.4	0.26	52.4*	0.27	53.4**	0.28	51.2	0.27	52.3*	0.27	53.6**	0.27	54.4	0.28	53.0**	0.27	50.1**	0.25
uPDI (18-90)	55.6	0.18	58.4	0.29	55.1**	0.30	53.0**	0.32	56.3	0.31	55.3*	0.32	55.2*	0.32	53.7	0.32	54.1	0.31	58.4**	0.28

[a] Data from the Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, n=1774. Data were collected by three 24h-recalls.
[b] Means adjusted for season of recall and weighted for the survey design. Significantly different from the mean of the first tertile: *, P<0.05; **, P<0.001; *P* ≥ 0.05, NS. P for ANOVA tests adjusted for season of recall.
ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; hPDI, healthy Plant-based Diet Index; LA, linoleic acid; MPF, unprocessed/minimally processed foods; NS, non-significant; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; PF, processed foods; SEM: standard error of the mean; SFA, saturated fatty acids; T, tertile; uPDI, unhealthy Plant-based diet Index, UPF, ultra-processed foods.

Supplementary Table S7 Predicted number of deaths avoided from cerebrovascular diseases, ischemic heart diseases and diabetes by each nutritional factor weighted in the comparative risk assessment using the EPIDiet model, in the context of a shift of the population's diet from the first tertile to the third tertile of the proportion of unprocessed/minimally processed foods (MPF), processed foods (PF) and ultra-processed foods (UPF) in the diet in the French adult population[a].

	Proportion of total energy intake from MPF – T3 vs T1			Proportion of total energy intake from PF – T3 vs T1			Proportion of total energy intake from UPF – T3 vs T1		
	Cerebrovascular diseases	Ischemic heart diseases	Diabetes	Cerebrovascular diseases	Ischemic heart diseases	Diabetes	Cerebrovascular diseases	Ischemic heart diseases	Diabetes
Death avoided or added by nutritional factors[b] (number)									
Whole grains	204	125	109	-177	-119	-104	-44	-16	-19
PUFA	38	474	NA	-3	-642	NA	-30	18	NA
Nuts & Seeds	NA	642	249	NA	-662	-245	NA	-19	-30
SFA	-36	-39	NA	-3	101	NA	31	-75	NA
MUFA	-18	-213	NA	-7	25	NA	25	133	NA
Dietary cholesterol	-3	-29	NA	2	-44	NA	8	64	NA
Seafood omega-3 fats	NA	800	NA	NA	-16	NA	NA	-703	NA
Vegetables	1017	419	NA	-226	-89	NA	-1049	-405	NA
Fibers	318	515	NA	-116	-118	NA	-192	-383	NA
Processed meats	NA	1157	364	NA	-14	-13	NA	-2164	-852
Total fat	-37	-113	NA	-6	142	NA	40	-87	NA
Fruits	814	504	NA	-421	-231	NA	-361	-182	NA
Sodium	245	260	NA	-389	-396	NA	179	177	NA
Alcohol	-27	-375	-93	-172	255	91	-285	94	-16
Red meats unprocessed	NA	NA	-124	NA	NA	7	NA	NA	51
SSB	-31	212	NA	-43	201	-22	-34	-527	-153
Death avoided or added because of energy intake and BMI[b] (number)									
Total energy	213	401	223	-193	-348	-209	63	90	57
BMI	180	375	167	-235	-391	-286	29	36	13
Total death avoided[b] (number)	2419 (2216, 2621)	4023 (3744, 4303)	665 (572, 759)	-1911 (-2109, -1713)	-1419 (-2097, -741)	-560 (-931, -188)	-1880 (-2165, -1595)	-5447 (-9439, -1457)	-1066 (-2248, 117)
Percentage deaths avoided[b] (%)	24.9 (22.8, 27.0)	30.9 (28.8, 33.0)	18.5 (15.9, 21.1)	-19.7 (-21.7, -17.6)	-10.9 (-16.1, -5.7)	-15.6 (-25.9, -5.2)	-19.4 (-22.3, -16.4)	-41.8 (-72.5, -11.2)	-29.6 (-62.5, 3.2)

[a] Dietary data from the Individual and National Study on Food Consumption Survey in France (INCA3). Data were collected by three 24h-recalls.
[b] Based on the numbers of disease-specific deaths observed in France in 2014. Negative values correspond to increasing deaths and positive values to decreasing deaths.
MPF, unprocessed/minimally processed foods; MUFA; Monounsaturated fatty acids; NA: Not applicable within the scope of this study; PF, processed foods; PUFA: Polyunsaturated fatty acids; SFA, Saturated fatty acids; SSB, sugar-sweetened beverage; T1: 1st tertile; T3: 3rd tertile; UPF, ultra-processed foods.

References

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2013) Dietary protein quality evaluation in human nutrition: report of an FAO expert consultation, 31 March-2 April, 2011, Auckland, New Zealand. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome

2. Anses (2016) Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses)., Maisons-Alfort, France

3. Anses (2011) Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses)., Maisons-Alfort, France

4. EFSA (European Food Safety Agency) (2017) Dietary Reference Values for nutrients: Summary report. 92. https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2017.e15121

5. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens) (2016) Scientific opinion on Dietary Reference Values for vitamin B6. EFSA Journal

6. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F (2018) Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. Nutrients 10:226. https://doi.org/10.3390/nu10020226

7. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, et al (2012) Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. PLoS ONE 7:e42155. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042155

8. de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F (2019) The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. The Journal of Nutrition 149:488–496. https://doi.org/10.1093/jn/nxy275

9. Anses (2019) Anses Opinion on the updating of the PNNS dietary guidelines for women from menopause and men over 65 years of age. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses)., Maisons-Alfort, France

10. Satija A, Bhupathiraju SN, Rimm EB, et al (2016) Plant-Based Dietary Patterns and Incidence of Type 2 Diabetes in US Men and Women: Results from Three Prospective Cohort Studies. PLoS Med 13:e1002039. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002039

11. Satija A, Bhupathiraju SN, Spiegelman D, et al (2017) Healthful and Unhealthful Plant-Based Diets and the Risk of Coronary Heart Disease in U.S. Adults. Journal of the American College of Cardiology 70:411–422. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.05.047

2.3. Article n°3 : Développement et évaluation, dans deux populations adultes françaises, d'un indice de sécurité nutritionnelle combinant des estimations probabilistes de risques de carences.

Résumé

Contexte : Il existe de nombreux indices de qualité de l'alimentation évaluant l'adhésion aux repères alimentaires, aux références nutritionnelles ou à certains régimes de référence. En revanche, il n'existe pas d'indice évaluant le risque de carence alors que 2 milliards d'individus dans le monde souffrent de carences en micronutriments.

Objectifs : Développer un indice (le SecDiet) permettant d'évaluer la sécurité nutritionnelle par l'estimation du risque de carences et évaluer sa validité apparente.

Méthode : Le SecDiet repose sur les apports en 12 nutriments pour lesquels des manifestations cliniques de carences dues à des insuffisances d'apports sont décrites dans la population générale adulte : vitamines A, B1, B2, B3, B9, B12, C, iode, sélénium, zinc, fer, calcium. Pour chacun de ces nutriments, sur la base de la littérature scientifique, un seuil correspondant à l'apport en dessous duquel le risque de carence n'est pas nul a été défini. Pour chaque nutriment, la probabilité que l'apport soit supérieur au seuil de carence est mesurée. Le SecDiet est la moyenne des probabilités au carré et varie de 0 à 1 – la valeur de 1 correspondant à des apports suffisants pour éviter toute carence chez un adulte sain. La validité de contenu et de construit du SecDiet a été évaluée dans deux populations adultes indépendantes : INCA3 (n=1774) et NutriNet-Santé (n=104 382). Les associations ont été évaluées entre le score et ses différentes composantes ainsi que des variables sociodémographiques connues pour être des déterminants d'apports faibles en micronutriments. Le comportement du SecDiet a été comparé à celui du PANDiet, un score de qualité globale de l'alimentation de construction similaire mais fondé sur les références nutritionnelles.

Résultats : Le SecDiet est élevé dans les deux populations d'étude (0,93 ± 0,09 dans INCA3 et 0,96 ± 0,06 dans NutriNet-Santé) indiquant un faible risque de carence au global. Le SecDiet est corrélé à chacune de ses composantes (r=+0,17 à r=+0,78, *P*s<0,001), validant qu'aucune carence n'est inutilement considérée. Le SecDiet est associé au revenu du ménage (*P*=0,002) à l'auto-perception de la situation financière, à la situation professionnelle et aux statuts d'insécurité et d'insuffisance alimentaires (*P*s<0,001) dans INCA3 et au revenu du ménage, à la situation professionnelle et au niveau d'éducation (*P*s<0,001) dans NutriNet-Santé. Dans les populations connues comme étant les plus à risque de carence, le SecDiet présente, contrairement au PANDiet, une distorsion de sa distribution vers la gauche, avec une fraction plus importante de la population ayant un SecDiet très bas. Dans NutriNet-Santé, les individus avec un faible SecDiet ont été identifiés (1er décile et 1er centile du SecDiet) et comparés aux individus avec un SecDiet plus élevé : ce sont plus souvent des femmes, jeunes (moins de 30 ans), célibataires et à faible revenu (*P*s<0,001).

Conclusion : Par rapport aux indices existants, le SecDiet est un nouvel outil permettant d'estimer le risque de carence et qui est sensible aux situations socioéconomiques associées au risque d'insécurité nutritionnelle. Il pourrait être utilisé pour identifier dans de vastes cohortes les individus en insécurité nutritionnelle ou pour étudier les risques nutritionnels associés à des changements de régimes alimentaires.

Valorisation : Ce travail a été publié dans la revue *British Journal of Nutrition* le 18 décembre 2020. La version présentée ci-après n'est pas la version publiée, mais la version acceptée pour publication dans *British Journal of Nutrition*, après examen par des pairs. La version, après travail d'édition, publiée, est disponible sur le lien suivant : https://doi.org/10.1017/S0007114520005115

Messages clés

- Nous avons développé un indice évaluant le risque de carence pour 12 nutriments à partir des apports alimentaires.
- Le SecDiet est élevé dans les deux populations étudiées, mais il y a des disparités entre les nutriments.
- Parmi les individus avec le SecDiet le plus faible, les femmes, les individus jeunes, célibataires ou en couple non marié, avec un niveau d'éducation faible, un faible revenu ou appartenant à certaines catégories socioprofessionnelles (chômeurs, étudiants, employés) sont plus représentés.
- Le risque de carence est plus élevé (c-à-d. le SecDiet est plus faible) pour les individus à faible revenu ou mauvaise perception de leur situation financière, les individus en situation d'insécurité ou d'insuffisance alimentaire et pour les individus au chômage ou les étudiants.
- Alors que le PANDiet reflète la qualité de l'alimentation dans sa capacité à fournir des nutriments dans des quantités adéquates par rapport aux références nutritionnelles, le SecDiet détecte spécifiquement le risque carentiel.

Development and evaluation of a new dietary index assessing nutrient security by aggregating probabilistic estimates of the risk of nutrient deficiency in two French adult populations.

Marion Salomé[1], Emmanuelle Kesse-Guyot[2], Hélène Fouillet[1], Mathilde Touvier[2], Serge Hercberg[2], Jean-François Huneau[1], François Mariotti[1]

[1] Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France

[2] Sorbonne Paris Nord University, Inserm, Inrae, Cnam, Nutritional Epidemiology Research Team (EREN), Epidemiology and Statistics Research Center – University of Paris (CRESS), 93017, Bobigny, France

Corresponding author: François Mariotti, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France, francois.mariotti@agroparistech.fr

Word count: 5438

Short title: Development of a nutrient security index

Key words: Nutrition, Dietary index, Nutritional security, Micronutrient deficiency

Abstract

Although micronutrient deficiencies affect 2 billion people worldwide, no index focusses on measuring the risk of overt nutrient deficiency. We aimed to develop an index that could capture the nutrient dimension of nutritional security, a nutrient security index (SecDiet), and evaluate its apparent validity. The SecDiet (range: 0-1) is based on the square-weighted average of the probabilities that the intake of 12 critical nutrients exceeds the threshold value associated with a risk of overt deficiency. Using adult populations from a French representative survey (INCA3, n=1,774) and a large cohort (NutriNet-Santé, n=104,382), the content and construct validity of the SecDiet was evaluated by estimating associations of the SecDiet with its components and with socio-demographic characteristics that are known to be associated with low micronutrient intakes and statuses. The SecDiet was high in the overall population (0.93±0.09 in INCA3) and markedly skewed towards 1 (i.e. lower risk of insufficient intake). It correlated positively with its 12 components (r=0.17-0.78, all *P*s<0.001). The SecDiet was associated with monthly income (*P*=0.002), perception of financial situation, professional situation, food insufficiency and security statuses (all *P*s<0.001) in the INCA3 population and with monthly income, professional situation, and level of education (all *P*s<0.001) in the NutriNet-Santé population. Unlike a broader nutrient-based quality index taken as comparison, the SecDiet mean decreased and the tail of its distribution notably extended downwards in at-risk sub-populations, thus revealing its specific sensitivity. The SecDiet could be used to screen sub-groups or study the determinants of nutrient insecurity in large population surveys.

Introduction

Micronutrient deficiency is a form of malnutrition, in the same way as under-nourishment or over-nourishment[1]. However, unlike the other two forms of malnutrition, it is sometimes less visible and may appear in addition to other form of malnutrition, including obesity[2]. It is considered as a major public health issue as it affects 2 billion people worldwide and has serious and sometimes irreversible health impacts[3,4]. Even in high income countries, nutrient deficiency remains the other side of the coin of the nutritional quality of the diet, and there are growing concerns with respect to vulnerable sub-populations.

Assessing the risk of micronutrient deficiency using nutrient intake data would be an effective way to estimate the risk in a population and take public health actions consequently[5]. However, to our knowledge, no index currently focuses specifically on assessing the risk of developing nutritional deficiency. There are many diet quality indices that assess the potential impacts of diet on the health of individuals and study adherence to food-based dietary guidelines[6,7]. These indices are generally based on food-based indicators and/or nutrient-based indicators[8].

Increasing importance has been given to food-based indices for defining diet quality because there is a growing evidence that long-term health is more realistically and confidently reflected by the overall characteristics of a diet[9]. However, these scores are not focused on nutrient intake and do not allow to directly study the risk of micronutrient deficiency. By contrast, nutrient-based assessments remain important in terms of fundamental relationships in nutrition, and notably the detection of poor diet quality due to insufficient nutrient intake, which is important for short-term health.

Nutrient-based indices are generally based on nutrient adequacy ratios (NAR) and mean adequacy ratios (MAR)[8,10,11] or on the probability of adequacy of nutrient intakes using a probabilistic approach[12–15]. They may be more difficult to implement than food-based indices, because they require extensive dietary records and food composition tables[16]. They need to refer to recommended intakes of selected nutrients but there are different criteria that can be used to define nutrient requirements and then estimate these reference values[13]. Nutrient requirements are usually defined using higher nutritional criteria than those which prevent the risk of onset of clinical signs of deficiency. Indeed, the requirements can be set so as to maintain a sufficient store of the nutrient, or to maximize metabolic/physiological markers[13] and may even also take account of the long-term risks of developing a chronic disease[17].

Therefore, existing diet quality indices are more designed to measure overall diet quality and associations with long-term health outcomes rather than nutritional status and the acute risk of nutrient deficiency. There is a need for such an index that aggregates risk estimates of micronutrient deficiency; a nutrient security index, that uses more stringent reference values that are associated with the appearance of clinical signs of deficiency. Such an indicator also appears critical for studying ongoing nutritional transition which changes the risk of nutrient shortage.

Our objective was to develop a score that focusses on the risk of nutritional deficiency in adults, by only selecting micronutrients for which a serious clinical deficiency is referenced, and using a probabilistic approach to estimate the risk of developing such a deficiency. The content and construct validity of this index was then assessed using data from two French surveys, one from

a national representative population and a second with a large number of participants which offered a wide variety of sociodemographic profiles.

Methods

Population data

The data used for this study came from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3, 2014-2015) and the NutriNet-Santé cohort study (2009, ongoing).

The third Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (INCA3) is a French nationwide and representative cross-sectional survey, which has been fully described elsewhere[18]. INCA3 study was carried out in accordance with the Declaration of Helsinki guidelines and was approved by the 'Comité Consultatif sur le Traitement de l'Information en matière de Recherche dans le domaine de la Santé' (Advisory Committee on Information Processing in Health Research). Verbal consent was obtained from, witnessed and formally recorded for all subjects. Briefly, dietary data were collected using three non-consecutive validated 24-h dietary recalls over a 3-wk period. Professional investigators were responsible for collecting the dietary records by telephone, and participants were not aware of the days of recall. The nutrient contents of food items came from the 2016 database of the *French Centre d'Information sur la Qualité des Aliments* (CIQUAL). Sociodemographic questionnaires were also completed, by administered face-to-face questionnaires. Under-reporters for energy intake (EI) were excluded using the Black's cut-offs based on the Goldberg method[19]. Basal metabolic rate (BMR) was estimated using Henry's equations [20]. Participants were not considered under-reporters for a ratio EI:BMR > PALxexp(-1.96xS/100) where PAL represents the physical activity level, and S a factor taking into account the variability of EI and BMR and depends on the number of dietary recalls. The study sample was initially composed of 2,121 adults (18-79y) and after exclusion of under-reporters the final sample contained 1,774 adults (749 men and 1,025 women).

The NutriNet-Santé study is an ongoing French web-based cohort which started in 2009 and has previously been fully described elsewhere[21]. The NutriNet-Santé study is conducted in accordance with the Declaration of Helsinki guidelines and was approved by the Institutional Review Board of the French Institute for Health and Medical Research (IRB Inserm no. 0000388FWA00005831) and the 'Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés' (CNIL no. 908450 and 909216). Electronic informed consent is obtained from each participant (EudraCT no. 2013-000929-31). All questionnaires are completed online via a web-based interface. At inclusion and every six months, participants are required to complete online three 24h dietary records over a 2-wk period. These web-based 24h dietary records have been validated against dietary records filled during an interview with a dietitian and against blood and urinary biomarkers[22–24]. Portion sizes are estimated using validated photographs[25]. The nutrient contents of food items come from a published food composition table[26]. As for the INCA3 study, under-reporters for energy intake were excluded using the same method[19], but basal metabolic rate was estimated using Schofield's equations[27]. Participants also complete questionnaires on health, sociodemographic characteristics, anthropometrics and physical activity. The sample used

during this study contained 104,382 adults over 18y (22,649 men and 81,733 women) and their dietary intake referred to 24h records collected over a 2-y period following inclusion in the cohort.

We chose to use data from these two populations in order to obtain firstly a representative sample of the French population (INCA3) for SecDiet score description purposes, and secondly a population where we could characterize the behaviour of this score in more deprived sub-populations because of the large number of participants (NutriNet-Santé).

Development of an index assessing the nutrient Security of Diet (SecDiet)

The SecDiet index has been designed to assess the risk of nutrient deficiency due to insufficient intakes of nutrients. In this study, the SecDiet has been developed for an adult population. It is built on the probabilistic approach[28] and computes, at an individual level, the probability for each nutrient of having an intake sufficiently high to avoid nutrient deficiency using the probability distribution of the standard normal distribution of nutrient requirements, and taking into account the mean intake y, the day-to-day variability of intake SD_y^2, the number of days of dietary record n, the inter-individual variability SD_r^2 and the nutrient reference value r[14,29], as follows:

$$F\left(\frac{y-r}{\sqrt{{SD_r}^2+\frac{{SD_y}^2}{n}}}\right)$$

where F(x) is the function returning the probability that an observation from the standard normal distribution is lower than x. The probability for a nutrient ranges from 0 to 1, where 1 represents a 100% probability that the usual intake is adequate.

The nutrient reference value was derived from what we defined as the 'deficiency threshold' (DT) corresponding to the minimal intake to avoid nutritional deficiency, which would therefore be the minimal criterion that could be used to set the requirement for this nutrient. We assumed that at an intake equal to the DT, ~97.5% of the population would have an intake sufficient to avoid nutritional deficiency and ~2.5% would be at risk of developing a nutritional deficiency. We then defined the 'average deficiency threshold' (aDT) corresponding to the intake with which 50% of the population would be at risk of having a nutritional deficiency. Assuming a normal distribution of the individual threshold centred at the aDT, the aDT was therefore defined as DT/(1+2CV). The CV was assumed to be similar to the CV of the average requirement.

Only nutrients for which a deficiency has been described in adults due to a primary insufficient intake and not secondary to a medical condition were included in the SecDiet. The inclusion of nutrients and the setting of deficiency thresholds were decided after a comprehensive review of the literature, notably concerning the principal nutrient recommendations in public dietary guidelines[17,30–33]. The nutrients included, because of the existence of deficiency due to insufficient intakes, were thus vitamin A, thiamin, riboflavin, niacin, folate, vitamin B12, vitamin C, iodine, iron, selenium, zinc, calcium, and deficiency thresholds were defined for adults based on experimental or epidemiologic studies as found reported in French, European and international dietary guidelines [30–35] and meta-analyses studies [36–38]. Deficiency thresholds are usually much lower

than the Reference Intakes which can be used in nutrient-based indexes, because Reference intakes are often based on criteria that are not easily interpretable in terms of health impact, or sometimes even unrelated to biological markers (such as *Adequate Intake* based on observed intake), whereas a deficiency threshold directly corresponds to the risk of an overt deficiency. For some nutrients, the onset of clinical signs of deficiency can be related to a certain amount of nutrient intake (e.g. scurvy may appear for intake of vitamin C below 10mg/day), and this intake was defined as the DT. In contrast, for some other nutrients (namely, thiamine, riboflavin, niacin, folate), there was not enough literature to derive a DT, therefore we defined it as the lower reference nutrient intake (which is the intake covering the standard requirements of 2.5% of the population). The selection of nutrients, their associated deficiency, and deficiency thresholds are shown in Table 1 and described in full in Supplemental Method 1.

Table 1. Nutrients included as components in the SecDiet score and associated deficiency and threshold values.

Nutrient	Deficiency	Threshold (DT)	CV	50% of risk (aDT)
Vitamin A[30]	Xerophtalmia	300 µg RE or 270 µg RE	15%	231 µg RE or 208 µg RE
Thiamin*[31]	Beriberi	0.18 mg/1000kcal	20%	0.13 mg/1000kcal
Riboflavin*[31]	Ariboflavinosis	1.0 mg	10%	0.83 mg
Niacin*[31]	Pellagra	4.35 mg NE/1000kcal	10%	3.63 NE/1000kcal
Folate*[31]	Megaloblastic anaemia	175 µg	15%	135 µg
Vitamin B12[32]	Megaloblastic anaemia	1 µg	15%	0.77 µg
Vitamin C[30]	Scurvy	10 mg	10%	8.3 mg
Iodine†[31]	Goitre	150 µg	20%	107 µg
Selenium[34]	Keshan disease	21 µg or 16 µg	15%	16.2 µg or 12.3 µg
Bioavailable iron†[33]	Anaemia	1.74 mg‡	40%	0.95 mg†
Bioavailable zinc[35]	Zinc deficiency	1.6 mg or 1.3 mg	15%	1.23mg or 1.0 mg
Calcium[36–38]	Fracture risk (long-term)	500 mg	15%	385 mg

DT, deficiency threshold; CV, coefficient of variation of the individual threshold; aDT, average deficiency threshold; RE, retinol equivalent; NE, niacin equivalent; EAR, Estimated Average Requirement.
* Because of insufficient data to define an intake at which clinical signs of deficiency may appear for these nutrients, the thresholds were defined as the intake covering the requirements of 2.5% of the population, defined as EAR(1-2CV) (see Supplemental Table 1).
† These thresholds parameters were then further corrected to calibrate the estimated average risk using figures for the national prevalence of goitre for iodine and of anaemia for iron. For iodine, the recalibrated DT was set at 100 µg and the aDT at 71.3 µg. For iron, the recalibrated DT was set at 0.70mg and the aDT at 0.38 (see Supplemental Method 1).
‡ This value applies to men and non-menstruating women. Requirements for menstruating women were estimated by considering menstrual losses using a Monte-Carlo simulation (see Supplemental Method 1).

The SecDiet score was then calculated as the sum of the squares of probabilities of nutrient adequacies divided by the number of nutrients included in the calculation. Squaring the probabilities was chosen in order to give more weight to the lowest probabilities among those of the different nutrients included in the score, the aim being to increase its sensitivity to the risk of one individual component over the other that would be expected to be close to the unity. Finally, the SecDiet ranges from 0 to 1 where 1 represents the lowest risk of insufficient nutrient intakes leading to nutrient deficiencies.

Evaluation of the validity of the SecDiet score

Content validity assesses whether the index covers all dimensions of what it is supposed to measure[39]. This was evaluated after a thorough review of the literature on dietary references

issued by the main health and food safety agencies[17,30–33]. Correlations between score components and the SecDiet were evaluated, as well as between the SecDiet and total energy intake to determine whether the SecDiet was able to assess certain quality features that would be independent of (energy-related) quantity.

Construct validity determines whether a score correctly measures what it is meant to measure, in this case nutrient security. We evaluated variations of the SecDiet across various sociodemographic subgroups that are known to be more prone to nutritional deficiency. These subgroups were the lowest income category[40], people with food insufficiency or food insecurity[41,42] and unemployed persons and students[43,44]. We hypothesized that the SecDiet score for most individuals would be lower in these groups, which might be reflected by a lower group mean and also a downwardly elongated distribution tail in these groups, compared to other groups.

The sociodemographic characteristics studied were professional occupations and monthly household incomes for the INCA3 and NutriNet-Santé populations and perception of financial situation, food insufficiency status and food insecurity status for INCA3 population only. For the present study, the professional occupation variable was rearranged into three categories: unemployed people, students and other occupations (grouping those with a professional activity and retired individuals). The monthly household income was calculated per consumption unit using the following weighting: 1 consumption unit (CU) was attributed for the first adult in the household, 0.5 CU for other persons aged ≥14y, and 0.3 CU for children aged<14y[45]. Perception of financial situation were obtained from a questionnaire designed to determine how a household evaluates its financial well-being. Food security and food insufficiency statuses came from the U.S. Household Food Security Survey Module (HFSSM)[46]. The food insufficiency status was derived from the preliminary question in the HFSSM survey and evaluates whether a household has had enough to eat during the past 12 months, while the food security status was obtained from the US Household Food Security Survey Module six-item short form.

Comparison with an overall diet quality index, the PANDiet score.

The behaviour of the SecDiet score within sociodemographic characteristics was compared to that of a nutrient-based diet quality index, the PANDiet score, in order to determine if the SecDiet is able to capture specific dimensions of nutrient intakes that are related to nutrient security, more than would a classical nutrient-based diet quality index.

The development and the validation of the PANDiet score is fully developed elsewhere[14]. It is based on the same probabilistic method than the SecDiet but differs in the choice of nutrients, nutrient reference values and computation of the final score. The probability is also calculated for each nutrient but the nutrient value is mainly based on national nutrient reference intakes for French adults[33] with more nutrients included.

The PANDiet score is based on two sub-scores, the Adequacy Sub-score, which is the average of probabilities of adequacy for 27 nutrients for which the usual intake should be above a reference value, multiplied by 100, and the Moderation Sub-score, which is the average of probabilities of adequacy for 6 nutrients for which the usual intake should not exceed a reference value, multiplied by 100. The PANDiet score is the average of the Adequacy Sub-score and the Moderation Sub-

Score and ranges from 0 to 100 where a higher score indicates a better diet quality. The nutrients included and their associated reference values are presented in Supplemental Method 2.

Statistical analyses

The weighting schemes proposed in INCA3 were used to account for the complex survey design. Spearman correlation coefficients were used to assess correlations between the SecDiet score and other variables. The NutriNet-Santé population was divided into deciles of SecDiet and the 1st decile of SecDiet was further stratified into deciles in order to reveal the characteristics of first ten percentiles of SecDiet, corresponding to the lowest SecDiet score and hence the population the most at risk of nutritional deficiency. Categorical variables are presented as percentages and differences across deciles and across first ten percentiles were determined using χ^2 tests. Descriptive statistics (mean, SD, range, quartiles, 5th and 95th percentiles) were used to describe the distribution of the SecDiet and the PANDiet in the population and across the sociodemographic characteristics studied and presented using boxplots. Kruskal-Wallis non-parametric tests were performed to assess significant differences between the SecDiet, the PANDiet and sociodemographic variables. Pairwise multiple comparisons within sociodemographic variables categories were assessed using the Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test.

All statistical analyses were performed using SAS version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.). Weighting schemes were considered using a weight statement. Significance was set at $P<0.05$.

Results

Distribution of the SecDiet score in study populations

In the INCA3 population, components of the SecDiet were correlated to each other and with the overall SecDiet (r=0.17 to r=0.78 with the SecDiet, all *P*s<0.001). The components with highest correlation coefficients were iodine (r=0.78), riboflavin (r=0.74), folate and calcium (r=0.70) and vitamin A (r=0.68), when compared to the lowest coefficients observed for thiamin (r=0.17) or niacin (r=0.20). The SecDiet was positively correlated with total energy intake (r=0.44) and with the PANDiet score (r=0.50) (Supplemental Table 1).

The distributions of the SecDiet in the INCA3 and NutriNet-Santé populations are presented in Figure 1 and were similar, with a distribution strongly skewed towards the upper bound of the score (i.e. 1).

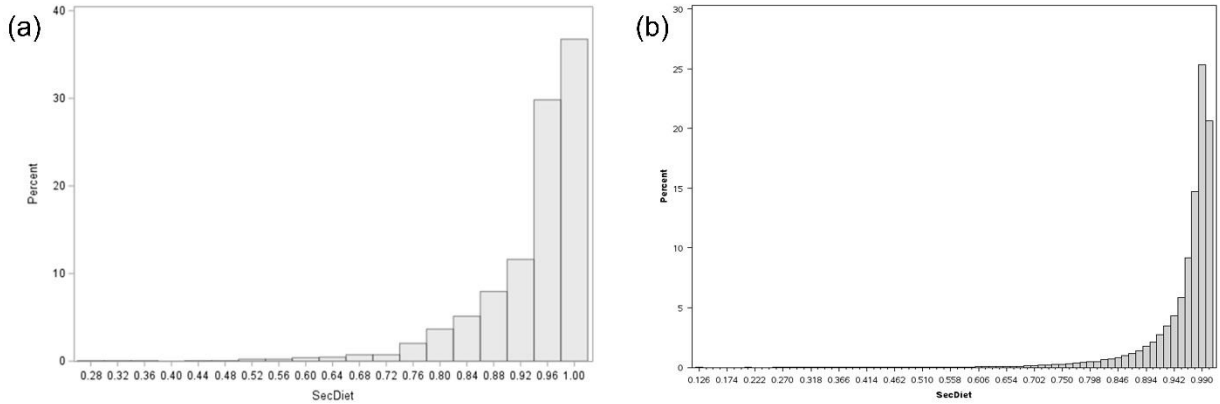


Figure 1. Distribution of the SecDiet score in (a) the INCA3 population (n=1,774) and (b) the NutriNet-Santé population (n=104,382).

In the INCA3 population, the mean SecDiet score was 0.93 ± 0.09. The lowest probabilities of adequacy were found for vitamin A (0.89 ± 0.18) and iodine (0.90 ± 0.15) (Table 2), i.e., individual components among the most strongly correlated with the overall score. In the NutriNet-Santé population, the mean SecDiet score was 0.96 ± 0.06. The lowest probability of adequacy was found for iodine (0.87 ± 0.20) (Table 3). In both populations, the SecDiet score was lower in women than in men (0.91 vs 0.94 in INCA3 and 0.95 vs 0.97 in NutriNet-Santé, respectively).

Table 2. SecDiet statistics and probabilities of adequacies for nutrients in the French adult population from the INCA3 survey (n=1,774).

	All (n=104,382)				Men (n=22,649)				Women (n=81,733)			
	Mean	SD	Median	Q1-Q3	Mean	SD	Median	Q1-Q3	Mean	SD	Median	Q1-Q3
SecDiet (0-1)	0.93	0.09	0.96	0.90 – 0.99	0.94	0.08	0.97	0.93 – 0.99	0.91	0.09	0.95	0.87 – 0.99
Probabilities of adequacy of the SecDiet score (0-1)												
Vitamin A	0.89	0.18	0.96	0.87 – 1.00	0.89	0.21	0.96	0.87 – 1.00	0.90	0.16	0.97	0.86 – 1.00
Thiamin	1.00	0.01	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.01	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.01	1.00	1.00 – 1.00
Riboflavin	0.94	0.12	1.00	0.94 – 1.00	0.96	0.11	1.00	0.97 – 1.00	0.92	0.13	0.99	0.89 – 1.00
Niacin	1.00	0.01	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.01	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.01	1.00	1.00 – 1.00
Folate	0.94	0.13	1.00	0.94 – 1.00	0.96	0.11	1.00	0.97 – 1.00	0.92	0.13	0.99	0.89 – 1.00
Vitamin B12	0.97	0.05	1.00	0.96 – 1.00	0.98	0.05	1.00	0.97 – 1.00	0.97	0.06	0.99	0.95 – 1.00
Vitamin C	0.97	0.05	1.00	0.97 – 1.00	0.98	0.05	1.00	0.98 – 1.00	0.97	0.05	0.99	0.96 – 1.00
Iodine	0.90	0.15	0.97	0.87 – 1.00	0.93	0.14	0.98	0.92 – 1.00	0.87	0.16	0.94	0.82 – 1.00
Selenium	0.99	0.02	1.00	1.00 – 1.00	0.99	0.02	1.00	1.00 – 1.00	0.99	0.02	1.00	1.00 – 1.00
Iron	0.97	0.07	0.99	0.96 – 1.00	0.98	0.05	1.00	0.98 – 1.00	0.95	0.08	0.99	0.94 – 1.00
Zinc	0.99	0.05	1.00	1.00 – 1.00	0.99	0.05	1.00	1.00 – 1.00	0.98	0.05	1.00	0.99 – 1.00
Calcium	0.94	0.14	0.99	0.94 – 1.00	0.95	0.13	1.00	0.96 – 1.00	0.92	0.15	0.99	0.90 – 1.00

Table 3. SecDiet statistics and probabilities of adequacies for nutrients in the French adult population from the NutriNet-Santé study (n=104,382).

	All (n=104,382)				Men (n=22,649)				Women (n=81,733)			
	Mean	SD	Median	Q1-Q3	Mean	SD	Median	Q1-Q3	Mean	SD	Median	Q1-Q3
SecDiet (0-1)	0.96	0.06	0.98	0.95 – 0.99	0.97	0.05	0.99	0.97 – 1.00	0.95	0.07	0.98	0.94 – 0.99
Probabilities of adequacy of the SecDiet score (0-1)												
Vitamin A	0.98	0.06	1.00	0.99 – 1.00	0.98	0.06	1.00	0.99 – 1.00	0.98	0.06	1.00	0.99 – 1.00
Thiamin	1.00	0.00	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.00	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.00	1.00	1.00 – 1.00
Riboflavin	0.96	0.12	1.00	0.99 – 1.00	0.98	0.08	1.00	1.00 – 1.00	0.96	0.13	1.00	0.99 – 1.00
Niacin	1.00	0.02	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.02	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.02	1.00	1.00 – 1.00
Folate	0.97	0.11	1.00	0.99 – 1.00	0.98	0.08	1.00	1.00 – 1.00	0.96	0.11	1.00	0.99 – 1.00
Vitamin B12	0.98	0.08	1.00	0.99 – 1.00	0.98	0.07	1.00	0.99 – 1.00	0.98	0.08	1.00	0.98 – 1.00
Vitamin C	0.99	0.03	1.00	1.00 – 1.00	0.99	0.04	1.00	1.00 – 1.00	0.99	0.03	1.00	1.00 – 1.00
Iodine	0.87	0.20	0.94	0.84 – 0.99	0.91	0.16	0.97	0.90 – 1.00	0.85	0.21	0.93	0.83 – 0.99
Selenium	1.00	0.02	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.02	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.02	1.00	1.00 – 1.00
Iron	0.99	0.04	1.00	0.99 – 1.00	0.99	0.03	1.00	1.00 – 1.00	0.99	0.04	1.00	0.99 – 1.00
Zinc	1.00	0.02	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.03	1.00	1.00 – 1.00	1.00	0.02	1.00	1.00 – 1.00
Calcium	0.97	0.11	1.00	0.99 – 1.00	0.98	0.09	1.00	1.00 – 1.00	0.97	0.11	1.00	0.99 – 1.00

Sociodemographic characteristics of individuals with a relatively low SecDiet score

We characterized the sociodemographic characteristics of the deciles and first ten percentiles of the SecDiet in the NutriNet-Santé population (Table 4). The CV of the SecDiet was very low, except for the 1st decile (11%) and 1st percentile (13%). More women and individuals who were younger, had a lower level of qualifications or of monthly income were found in lower SecDiet score (all *P*s<0.001, except for sex across first 10th percentiles where *P*=0.465). Compared to the 10th decile, individuals in the 1st decile were more often single (28.4% vs 14.6%) or living as an unmarried couple (29.8% vs 19.2%). Individuals in the 1st percentile were predominantly single (36.3%). Individuals with lower SecDiet score were more likely to be unemployed (11.8% in the 1st percentile, 9.1% in the 1st decile vs 4.2% in the 10th decile), students (21.9% in the 1st percentile, 16.0% in the 1st decile vs 4.1% in the 10th decile) and employees (27.2% in the 1st percentile, 25.2% in the 1st decile vs 14% in the 10th decile).

Table 4. Sociodemographic characteristics according to deciles (1st, 5th, 10th) and lower percentiles (1st, 5th, 10th) of the SecDiet score in the French adult population from the NutriNet-Santé study (n=104,382).

	Deciles of SecDiet				Percentiles of SecDiet			
	1st decile (n=10,438)	5th decile (n=10,438)	10th decile (n=10,438)	P†	1st percentile (n=1,043)	5th percentile (n=1,044)	10th percentile (n=1,043)	P‡
SecDiet*	0.80 ± 0.09 11.25%	0.98 ± 0.00 0.00%	1.00 ± 0.00 0.00%		0.60 ± 0.08 13.33%	0.82 ± 0.01 1.22%	0.88 ± 0.00 0.00%	
Sex, %				<0.001				0.465
Men	13.81	20.37	35.47		14.67	13.22	15.72	
Women	86.19	79.63	64.53		85.33	86.78	84.28	
Age group, %				<0.001				<0.001
<30 y	42.29	25.39	15.59		53.50	43.01	37.97	
30-45 y	30.03	29.72	29.48		26.85	29.98	29.72	
45-60 y	18.79	26.94	31.44		13.52	19.25	21.67	
>60 y	8.89	17.95	23.49		6.14	7.76	10.64	
Matrimonial status, %				<0.001				<0.001
Single	28.38	17.47	14.59		36.34	26.82	24.93	
Married	32.07	47.84	56.65		22.91	33.43	35.09	
Unmarried couple	29.81	24.50	19.18		30.78	30.36	30.49	
Separated/Divorced	8.56	8.31	7.42		8.92	8.62	8.44	
Widowed	1.17	1.87	2.14		0.96	0.77	1.05	
Not available	0.01	0.02	0.02		0.10	0.00	0.00	
Level of qualifications, %				<0.001				<0.001
Secondary education	21.66	18.80	18.44		26.54	20.64	19.56	
Bachelor's degree	23.27	17.52	14.13		27.40	22.95	21.77	
Higher education	55.07	63.68	67.43		46.06	56.41	58.67	
Monthly income per household unit, %				<0.001				<0.001
<€900 €	20.42	9.54	6.27		27.04	20.50	17.55	
€900-1200 €	8.46	6.47	5.27		8.44	8.14	7.86	
€1200-1800 €	25.19	24.71	24.77		23.78	27.87	25.89	
€1800-2300 €	11.50	14.02	15.05		7.96	10.54	11.89	
€2300-2700 €	6.18	9.03	10.40		4.31	5.75	7.57	
€2700-3700 €	8.47	14.37	17.25		6.90	8.24	9.88	
>€3700 €	4.91	9.80	12.09		3.84	4.02	5.66	
Not available	14.89	12.06	8.89		17.74	14.94	13.71	
Occupational categories, %				<0.001				<0.001
Employee	25.21	17.77	14.00		27.23	23.75	22.05	
Manual worker	1.66	1.22	1.42		2.21	2.39	1.15	
Farmer	0.19	0.22	0.46		0.10	0.29	0.38	
Managerial staff	15.97	23.41	25.82		12.18	15.04	18.98	
Self-employed	2.26	1.69	1.45		1.73	2.39	1.92	
Intermediate profession	14.16	17.30	18.34		9.78	15.42	16.20	
Student	16.00	8.02	4.09		21.86	16.09	13.14	
Retired	8.53	18.16	25.36		5.56	7.38	10.64	
Unemployed people	9.08	5.91	4.20		11.79	9.96	8.63	
Other without occupation	6.70	6.16	4.84		7.29	6.99	6.71	
Other non-specified	0.19	0.10	0.04		0.29	0.19	0.10	
Not available	0.06	0.04	0.00		0.00	0.10	0.10	

* Mean ± SD, CV
† P values are from χ^2 test between deciles of SecDiet.
‡ P values are from χ^2 test between first ten percentiles of SecDiet.

The SecDiet score of groups in which a higher risk of nutrient deficiency was expected and comparison with the PANDiet score

The SecDiet score was plotted according to the monthly income per household unit and the professional occupation in the INCA3 and the NutriNet-Santé populations (Figure 2). In both populations, the SecDiet decreased with lower monthly income. In the INCA3 population, the SecDiet decreased from 0.94 ± 0.07 for the highest income bracket to 0.91 ± 0.11 for the lowest income bracket (*P*=0.002, Supplemental Table 2). In the NutriNet-Santé population, the SecDiet decreased from 0.97 ± 0.05 for the highest income bracket to 0.94 ± 0.08 for the lowest income bracket (*P*<0.001, Supplemental Table 3). Regarding the professional situation, the SecDiet was lower among the unemployed people (0.91 ± 0.09) vs other occupations (0.93 ± 0.09) but did not differ significantly for students (0.92 ± 0.11) vs other occupations in the INCA3 population (Supplemental Table 4). In the NutriNet-Santé population, the SecDiet score was lower among the unemployed people (0.94 ± 0.08) and students (0.93 ± 0.08) compared to other occupations (0.96 ± 0.06) (*P*<0.001) (Supplemental Table 5).

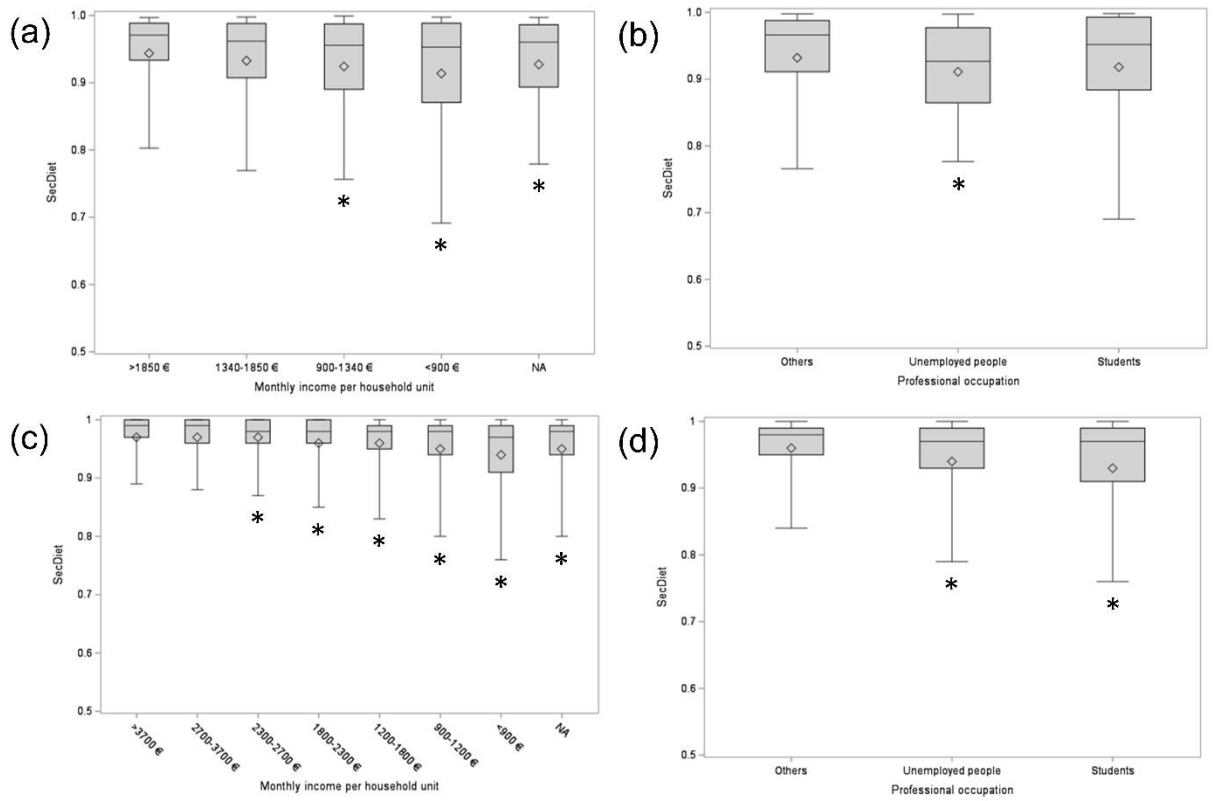


Figure 2. SecDiet score according to monthly income per household unit ((a) and (c)) and professional occupation ((b) and (d)) in the INCA3 population (n=1,774) and the NutriNet-Santé population (n=104,382), respectively. * Significantly different from the reference (“>1850€” or “>3700€” respectively for monthly income per household unit in the INCA3 population or the NutriNet-Santé population, “Others occupation” for professional occupation) assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons (significance was set at P<0.05). NA, not available.

The differences between the SecDiet and the PANDiet scores were studied in the INCA3 population by comparing their behaviours according to the perception of financial situation, the food insufficiency and food insecurity statutes (Figure 3).

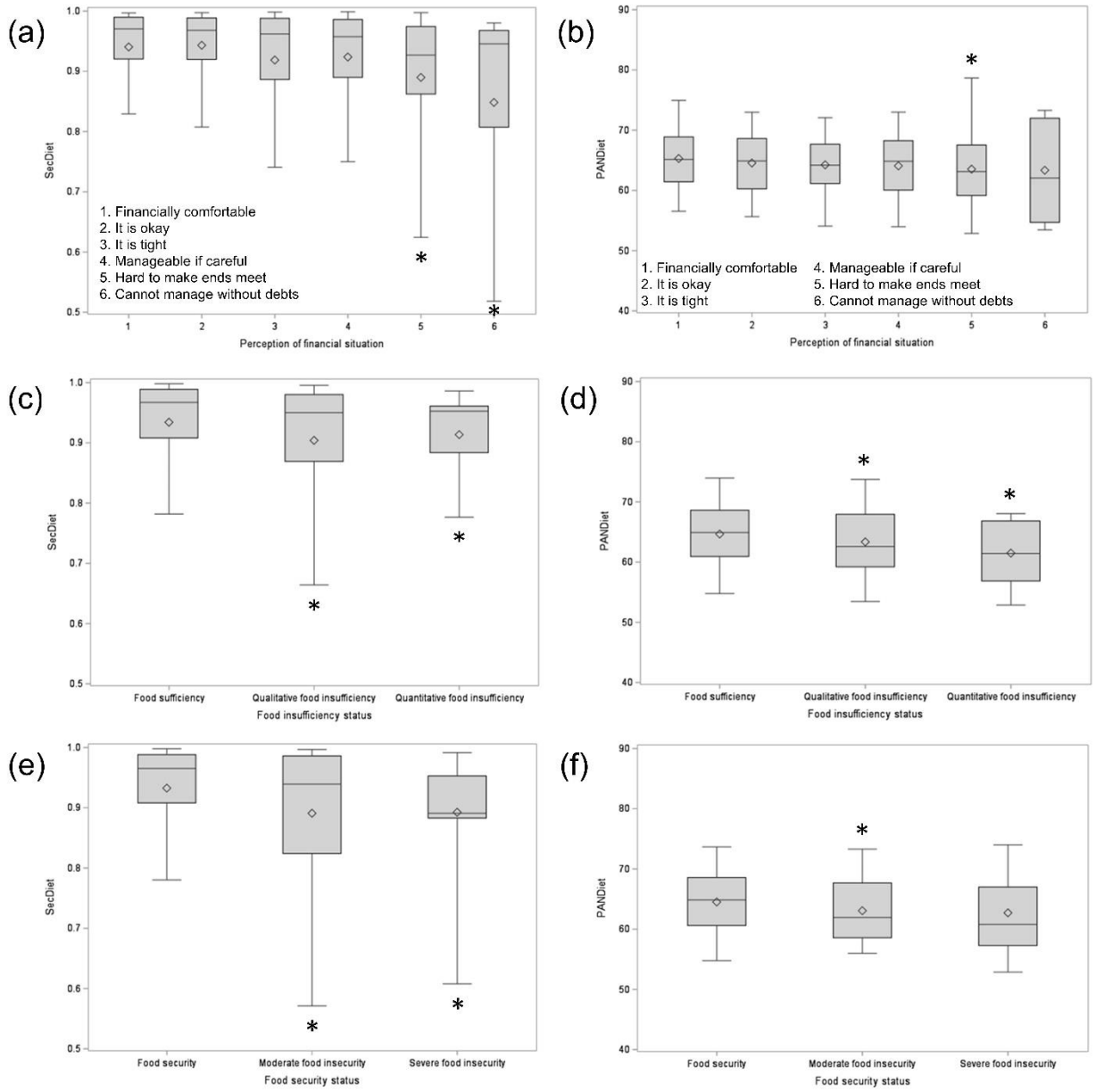


Figure 3. (a) SecDiet and (b) PANDiet scores according to the perception of financial situation; (c) SecDiet and (d) PANDiet scores according to food insufficiency status; (e) SecDiet and (f) PANDiet scores according to food security status in the INCA3 population (n=1,774). * Significantly different from the reference ("Financially comfortable" for perception of financial situation, "Food sufficiency" for food insufficiency status, "Food security" for food security status) assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons (significance was set at P<0.05).

Both the SecDiet and the PANDiet scores decreased with lower perception of financial situation. However, the decrease was more important for the SecDiet. The difference of the SecDiet between the "Financially comfortable" status (0.94 ± 0.08) and the "Can't manage without debts" status (0.85 ± 0.14) represented a 9.6% decrease, whereas between the same two statutes, the decrease of the PANDiet was of 2.9% (Supplemental Table 6). Furthermore, it was important to note that the distribution of the SecDiet spread downwards in subpopulations with the lowest financial situations compared to the PANDiet score (Figures 3(a) and 3(b)). Indeed, the SecDiet CV was 16.5% in the lowest financial situation class and 8.5% in the highest financial situation class. The PANDiet and SecDiet scores were both significantly different across food insufficiency status groups (*Ps*<0.001), with higher scores for food sufficiency status compared to qualitative and quantitative food insufficiency statutes (Supplemental Table 7). The SecDiet score was higher for food security status (0.93 ± 0.08) compared to moderate food insecurity (0.89 ± 0.13) and severe food insecurity (0.89 ± 0.10), which both had similar SecDiet score (*P*<0.001). The PANDiet score was only significantly different for moderate food insecurity (63.07 ± 5.73) compared to food security (64.53 ± 5.73) (*P*=0.002) (Supplemental Table 8).

As highlighted by the boxplot representations, the main difference between the SecDiet and the PANDiet score was the specific spreading of the boxplots towards lower SecDiet scores (i.e. decrease in the 5th percentile) for food insufficiency and food insecurity statutes, which was not observed with the PANDiet.

Discussion

The aim of this study was to evaluate the validity of a new dietary index that describes the nutrient security of diet, the SecDiet. This index consists in an aggregate probabilistic assessment of the risk of deficiency for 12 micronutrients that are of potentially considerable importance to public health. After an in-depth examination, the SecDiet displayed a good content and construct validity. Unlike an overall nutrient-based diet quality index, the SecDiet is particularly sensitive to situations that are known to increase nutritional insecurity.

We decided to include these 12 micronutrients after a review of the literature regarding the reality and severity of selective deficiencies of all micronutrients[17,30,31,47]. The SecDiet includes the most widespread micronutrient deficiencies, which are iron, iodine, folate, vitamin A and zinc deficiencies[3]. The lower reference values were defined as the minimal intake below which clinical signs of deficiency might appear and were taken from international expert consensus reports. The SecDiet score is therefore appropriate for use in other countries, including low- and middle-income countries, because it is mostly not based on national reference values. However, the parameters were based on reference values for adults so are not readily applicable to other populations such as children or pregnant women. For two nutrients, namely iron and iodine, we were able to recalibrate the estimation of the risk of deficiency on the national prevalence of anaemia (haemoglobin <13 g/dl for men and <12 g/dl for women)[48] and goitre[49]. Indeed, although the reference values employed offer a good reflection of the minimal intake required to prevent deficiency (based on data in the literature) it appears that these thresholds overestimate the risk when compared to the figures regarding the actual prevalence of deficiency. To be adaptable to other populations and settings, worldwide prevalence estimates for anaemia[50] and goitre could

be used[51], or estimates for the country under study, if these data are available. This approach is interesting because it involves theoretical information that links individual dietary records to the actual average risk estimates observed directly in the population.

We found that the SecDiet score was positively correlated to all its components, but coefficients of correlations revealed that all components did not make the same contribution to this score. These differences indicate that some nutrients have little influence on variations of the SecDiet score, presumably because current intakes in these populations are high compared to the reference threshold used here to estimate the risk of overt deficiency. By contrast, other nutrients were more strongly correlated with the SecDiet score and were also those with the lowest means (vitamin A, riboflavin, folate, iodine and calcium), suggesting a higher risk of developing a clinical deficiency of these nutrients. It appears that the SecDiet score was not independent of energy intake; a higher energy intake being associated with a lower risk of developing nutritional deficiency, as had been expected. The SecDiet is therefore not fully and specifically a diet quality index, inasmuch as it is also associated with (energy) quantity. This was to be expected, since the SecDiet is rather an aggregate estimate of the risk of deficiency.

Lower SecDiet scores were found in people with low monthly incomes and low perceptions of their financial situation. It is widely acknowledged that poverty is one of the main causes of undernutrition worldwide, and that low- and middle-income countries have the highest prevalence of micronutrient deficiencies[3]. Indeed, low socioeconomic status is generally associated with poor diet quality, which can be explained by several factors such as food prices and access, education in nutrition or the time required for cooking[52]. Several studies have shown that adults with lower socioeconomic status have lower plasma ascorbic acid concentrations[53] and lower intakes of micronutrients such as calcium and iron[54]. Here we have identified a situation of acute nutritional risk in the most deprived part of the general population. The SecDiet score was also lower in unemployed people and students, which is in line with studies reporting lower micronutrient intakes among students[44,55,56] and lower calcium intakes in households where the family head is unemployed[57]. Low-income households are generally constrained to choose discount products and energy-dense foods with low micronutrient contents[43,52]. Likewise, when characterizing individuals with a low SecDiet score, we also found more people with lower levels of education and monthly income, as well as more women, younger adults and single or unmarried couples. Single women with children and a low income have been reported to have lower nutrient intakes, which could be secondary to giving nutritional priority to their children[58,59].

As expected, the SecDiet score was lower among adults living in households suffering from food insecurity or food insufficiency. Indeed, it has been seen in the US that, in food-insufficient families, younger adults had lower calcium intakes, and older adults had lower intakes of iron and zinc when compared to adults in food-sufficient families. Both younger and older adults had lower serum concentrations of vitamin A compared to adults in food-sufficient families[41]. A study in Canada found that adults in food insecure households had a higher prevalence of inadequacy for vitamin A, zinc, folate, vitamin B12 and iron but this was dependent on sex and age category[42]. However, it is not surprising that low SecDiet score is associated with both low socioeconomic status and food insufficiency and food insecurity because these characteristics may be correlated to each other. A study in the UK found that participants living in food insecurity tended to have

more problems making ends meet and were often students, younger, males and had a low level of education[60].

By contrast, the PANDiet score did not show the same range of variation than the SecDiet regarding sociodemographic characteristics. If it also decreased with lower socioeconomic status, the lower tail of the distribution did not drop as it was observed with the SecDiet. Therefore, the SecDiet appears to be more specific than a broad index of dietary quality to detect situations with higher risk of nutrient deficiency. The two scores were positively, but not entirely, correlated (r=+0.50), meaning that the SecDiet score is associated with overall nutrient adequacy but confirming that it describes a situation that is more specific, based on fewer nutrients and another type of hazard (lower threshold).

The SecDiet score nevertheless has certain limitations. Because of a lack of data and scientific evidence, it was necessary to derive some minimal thresholds from estimates of standard requirements by defining the deficiency threshold as the intake covering requirement for only 2.5% of the population. This was the case for thiamin, riboflavin, niacin, folate. These minimal intakes could be refined in future when specific studies are available. Regarding the construction of the score, the probabilistic approach is a method that has been recommended and previously validated[13,14] for assessing risk of inadequacy based on nutrient requirements and intakes, but we needed to assume a normal distribution around the average deficiency threshold (which is the intake at which the individual risk of a nutritional deficiency would be 50%) and to define a CV corresponding to CV used for nutrient requirements. The distribution model and parameters remains theoretical, although neither more nor less than in all generic probabilistic-based nutrient risk assessment methods[12,13]. Similar to those methods, normality of the distribution of the DT is assumed except for iron. It may also be important to note that this score only provides tools to measure the risk of micronutrient deficiency in the general population due to insufficient intake and not to a medical condition (such as malabsorption issues or being under a treatment interfering with micronutrient metabolism), and therefore does not cover all possible situations leading to micronutrient deficiency. Indeed, the main objective of the SecDiet was to be applied to a given population so as to study the risk of micronutrient deficiency solely attributable to insufficient food intake, independently of a particular health status of certain individuals.

In this study, dietary supplements consumption was not considered but this may not have changed the observed results since, in France, it has been shown that dietary supplements consumption only slightly improves nutrient adequacy[61]. Furthermore, it has been shown in the NutriNet-Santé study that consumers of dietary supplements rather belonged to higher socio-professional category and had lower prevalence of inadequate nutrient intake compared to non-consumers of dietary supplements[62]. So dietary supplements are generally consumed by those who need it the least. Our results highlighted that low SecDiet score, and therefore higher risk of nutritional deficiency, was observed in individuals with lower-socioeconomic status, which are less prone to consume dietary supplements.

Further studies should consist in validating the criteria using data that could demonstrates the associations between the SecDiet score and measurements of biomarkers or clinical signs indicative of individual micronutrient deficiencies in a more disadvantaged population. Furthermore, such data could be used to set a cut-off point for discriminating individuals at risk of

deficiency. It would also provide an opportunity to recalibrate the score so that it precisely matches the population-based risk of deficiency. However, it is often more difficult to obtain data from the most disadvantaged individuals in nationwide population surveys because they may be homeless, unemployed or not-speaking the national language[54]. When assessing nutritional status from dietary surveys, discarding under-reporters has the advantage of avoiding that nutrient insufficiency is over-estimated. The fact that the SecDiet was associated with energy intake in our samples confirms that underestimate of energy intake would result in a downward bias of nutrient security. In the application of this method, therefore, care must be taken to minimize under-reporting, especially in people with low energy requirement. The Goldberg/Black cutoffs/methods that we used has limitation, but has been widely used and remain a standard for identifying under-reporters. One limitation of this method is the identification of under-reporters for individuals with high energy requirement[19]. This type of error is however the one that would have the least implication on the bias of the SecDiet.

Micronutrient deficiency is also referred to as hidden hunger because unlike other types of malnutrition, it is frequently less visible[3,5] so the SecDiet might offer an effective tool to screen those who are more at risk of micronutrient deficiency in a representative population and identify the socioeconomic characteristics that are more predictive of nutritional insecurity. So as to further validate the method, further studies could also interestingly focus on specific populations with an expected higher food and nutrition insecurity, such as for instance older adults in assisted living facilities or college campus. Dedicated studies on the latter population would confirm and better characterize the nutritional risk that we have identified in the large general samples in this study. Lastly, this score could also be very useful when studying different diet models or simulating possible future diet changes. Indeed, sustainable diets have been advocated to ensure human and planetary health[63,64], but adherence to them requires substantial dietary changes that reduce the intake of certain nutrients, particularly those from animal-based foods. However, the degree to which this might create a real short-term risk for health that could partly offset the benefits for long-term health remains uncertain. It is therefore important to characterize the true acute risk in this setting and determine detailed characteristics of the diet that modulate this risk.

In conclusion, we propose here a new index based on the probabilistic risk of micronutrient deficiency. While the present study used data from French populations, the SecDiet could be applied in other countries because it is mostly not based on national dietary requirements. We were able to show that the SecDiet score was indeed associated with low socioeconomic status and to identify populations with an expected higher risk of nutrient insecurity. The SecDiet would therefore be a useful tool to study the risk of micronutrient deficiency in a vast representative population or in more specific sub-populations in which nutritional insecurity is suspected, and it might also be used as a safeguard parameter when studying prospective dietary transitions.

Acknowledgements
The authors sincerely thank all the volunteers of the NutriNet-Santé cohort for their continuous participation in the study. We also thank Younes Esseddik, Thi Hong Van Duong, Régis Gatibelza, Jagatjit Mohinder, and Aladi Timera (computer scientists); Fabien Szabo de Elenyi, Nathalie Arnault, Julien Allegre, and Laurent Bourhis (datamanager/statisticians); Cédric Agaesse (dietitian); Sandrine Kamdem (physicians); and Nathalie Druesne-Pecollo (operational coordinator) for their technical contribution to the NutriNet-Santé study.

Financial support
M Salomé's PhD fellowship is currently being funded by a research contract with Terres Univia, the French Interbranch organization for plant oils and proteins. F Mariotti is the scientific leader of this contract.

NutriNet-Santé was supported by the following public institutions: Ministère de la Santé, Santé Publique France, Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM), Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), Conservatoire National des Arts et Métiers (CNAM) and Université Sorbonne Paris Nord.

Conflict of Interest
None

Authorship
M.S., J-F.H., and F.M. designed the research; M.S. and E.K-G. conducted the research, analysed the data and performed statistical analyses; H.F., M.T., S.H., J-F.H. and F.M. provided methodological tools and support; M.S. and F.M. interpreted the results; M.S. wrote the first draft of the manuscript and all authors provided critical comments on the manuscript. M.S. and F.M. have primary responsibility for the final content and all authors read and approved the final manuscript.

References

1. World Health Organization (2020) Fact sheets - Malnutrition. https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/malnutrition (accessed November 2020).

2. Kaidar-Person O, Person B, Szomstein S, et al. (2008) Nutritional Deficiencies in Morbidly Obese Patients: A New Form of Malnutrition?: Part A: Vitamins. *OBES SURG* **18**, 870–876.

3. Bailey RL, West Jr. KP & Black RE (2015) The Epidemiology of Global Micronutrient Deficiencies. *Ann Nutr Metab* **66**, 22–33.

4. Ritchie H & Roser M (2017) Micronutrient Deficiency. *Our World in Data*. https://ourworldindata.org/micronutrient-deficiency (accessed May 2020).

5. Muthayya S, Rah JH, Sugimoto JD, et al. (2013) The Global Hidden Hunger Indices and Maps: An Advocacy Tool for Action. *PLoS ONE* **8**, e67860 [Noor AM, editor].

6. Wirt A & Collins CE (2009) Diet quality – what is it and does it matter? *Public Health Nutr.* **12**, 2473–2492.

7. Arvaniti F & Panagiotakos DB (2008) Healthy Indexes in Public Health Practice and Research: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **48**, 317–327.

8. Kant AK (1996) Indexes of overal diet quality: A review. *J Am Diet Assoc* **96**, 785–791.

9. Kant AK (2004) Dietary patterns and health outcomes. *Journal of the American Dietetic Association* **104**, 615–635.

10. Madden JP & Yoder MD (1971) Program Evaluation: Food Stamps and Commodity Distribution in Rural Areas of Central Pennsylvania. .

11. Jun S, Zeh MJ, Eicher-Miller HA, et al. (2019) Children's Dietary Quality and Micronutrient Adequacy by Food Security in the Household and among Household Children. *Nutrients* **11**, 965.

12. Carriquiry AL (1999) Assessing the prevalence of nutrient inadequacy. *Public Health Nutr.* **2**, 23–34.

13. National Research Council (1986) *Nutrient Adequacy: Assessment Using Food Consumption Surveys.* Washington, DC: National Academies Press.

14. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, et al. (2012) Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. *PLoS ONE* **7**, e42155 [Cameron DW, editor].

15. Arimond M, Wiesmann D, Becquey E, et al. (2010) Simple Food Group Diversity Indicators Predict Micronutrient Adequacy of Women's Diets in 5 Diverse, Resource-Poor Settings. *The Journal of Nutrition* **140**, 2059S-2069S.

16. Trijsburg L, Talsma EF, de Vries JHM, et al. (2019) Diet quality indices for research in low- and middle-income countries: a systematic review. *Nutrition Reviews* **77**, 515–540.

17. Otten JJ, Hellwig JP & Meyers LD (editors) (2006) *DRI, dietary reference intakes: the essential guide to nutrient requirements*. Washington, D.C: National Academies Press.

18. Dubuisson C, Dufour A, Carrillo S, et al. (2019) The Third French Individual and National Food Consumption (INCA3) Survey 2014–2015: method, design and participation rate in the framework of a European harmonization process. *Public Health Nutr.* **22**, 584–600.

19. Black A (2000) Critical evaluation of energy intake using the Goldberg cut-off for energy intake:basal metabolic rate. A practical guide to its calculation, use and limitations. *Int J Obes* **24**, 1119–1130.

20. Henry C (2005) Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutr.* **8**, 1133–1152.

21. Hercberg S, Castetbon K, Czernichow S, et al. (2010) The Nutrinet-Santé Study: a web-based prospective study on the relationship between nutrition and health and determinants of dietary patterns and nutritional status. *BMC Public Health* **10**, 242.

22. Touvier M, Kesse-Guyot E, Méjean C, et al. (2011) Comparison between an interactive web-based self-administered 24 h dietary record and an interview by a dietitian for large-scale epidemiological studies. *Br J Nutr* **105**, 1055–1064.

23. Lassale C, Castetbon K, Laporte F, et al. (2015) Validation of a Web-based, self-administered, non-consecutive-day dietary record tool against urinary biomarkers. *Br. J. Nutr.* **113**, 953–962.

24. Lassale C, Castetbon K, Laporte F, et al. (2016) Correlations between Fruit, Vegetables, Fish, Vitamins, and Fatty Acids Estimated by Web-Based Nonconsecutive Dietary Records and Respective Biomarkers of Nutritional Status. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics* **116**, 427-438.e5.

25. Hercberg S, Deheeger M & Preziosi P (2002) *SU. VI. MAX. Portions alimentaires: manuel-photos pour l'estimation des quantités*. Paris: Editions Polytechnica.

26. Hercberg S (Coordinator) (2005) *Table de composition SU. VI. MAX des aliments*. Paris: Les éditions INSERM/Economica.

27. Schofield WN (1985) Predicting basal metabolic rate, new standards and review of previous work. *Hum Nutr Clin Nutr* **39 Suppl 1**, 5–41.

28. Institute of Medicine Food and Nutrition Board (2000) *Dietary Reference Intakes: Applications in Dietary Assessment*. Washington, D.C.: National Academies Press.

29. de Gavelle E, Huneau J-F & Mariotti F (2018) Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. *Nutrients* **10**, 226.

30. World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations (editors) (2004) *Vitamin and mineral requirements in human nutrition*. 2nd ed. Geneva : Rome: World Health Organization ; FAO.

31. EFSA (European Food Safety Agency) (2017) Dietary Reference Values for nutrients: Summary report. 92.

32. Nordic Council of Ministers (2014) *Nordic Nutrition Recommendations 2012: Integrating nutrition and physical activity.* Copenhagen: Nordic Council of Ministers.

33. Anses (2016) *Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles.* Maisons-Alfort, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).

34. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations & International Atomic Energy Agency (editors) (1996) *Trace elements in human nutrition and health*. Geneva: World Health Organization.

35. Institute of Medicine (U.S.) & Panel on Micronutrients (2002) *Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc*. Washington, D.C.: National Academy Press.

36. Wang D, Chen X-H, Fu G, et al. (2015) Calcium intake and hip fracture risk: a meta-analysis of prospective cohort studies. *Int J Clin Exp Med*.

37. Bolland MJ, Leung W, Tai V, et al. (2015) Calcium intake and risk of fracture: systematic review. *BMJ*, h4580.

38. Bischoff-Ferrari HA, Dawson-Hughes B, Baron JA, et al. (2007) Calcium intake and hip fracture risk in men and women: a meta- analysis of prospective cohort studies and randomized controlled trials1–3. *Am J Clin Nutr*.

39. Bland J & Altman D (2002) Statistics Notes: Validating scales and indexes. *BMJ* **324**, 606–607.

40. Andrieu E, Darmon N & Drewnowski A (2006) Low-cost diets: more energy, fewer nutrients. *Eur J Clin Nutr* **60**, 434–436.

41. Dixon LB, Winkleby MA & Radimer KL (2001) Dietary Intakes and Serum Nutrients Differ between Adults from Food-Insufficient and Food-Sufficient Families: Third National Health and Nutrition Examination Survey, 1988–1994. *The Journal of Nutrition* **131**, 1232–1246.

42. Kirkpatrick SI & Tarasuk V (2008) Food Insecurity Is Associated with Nutrient Inadequacies among Canadian Adults and Adolescents. *The Journal of Nutrition* **138**, 604–612.

43. Smed S, Tetens I, Bøker Lund T, et al. (2018) The consequences of unemployment on diet composition and purchase behaviour: a longitudinal study from Denmark. *Public Health Nutr.* **21**, 580–592.

44. Correa-Rodríguez M, Pocovi G, Schmidt-RioValle J, et al. (2018) Assessment of dietary intake in Spanish university students of health sciences. *Endocrinología, Diabetes y Nutrición* **65**, 265–273.

45. INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques) Definitions, methods and quality. https://www.insee.fr/en/information/2107769.

46. US Department of Agriculture (2012) U.S. Household Food Security Survey Module. https://www.ers.usda.gov/topics/food-nutrition-assistance/food-security-in-the-us/survey-tools/.

47. Biesalski HK & Grimm P (2005) *Pocket atlas of nutrition*. Rev. translation of 3rd German ed. Stuttgart ; New York: Thieme.

48. Equipe de Surveillance et d'épidémiologie nutritionnelle (ESEN) (2019) *Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (Esteban), 2014-2016. Volet Nutrition. Chapitre Dosages biologiques : vitamines et minéraux*. Saint-Maurice, France: Santé Publique France.

49. Wémeau J-L (2010) Chapitre 8. Goitres simples et nodulaires. In *Les maladies de la thyroïde*. Masson.

50. WHO (2015) *The global prevalence of anaemia in 2011.* Geneva: World Health Organization.

51. Benoist B de, Andersson M, Egli I, et al. (2004) *Iodine status worldwide WHO global database on iodine deficiency*. Geneva: World Health Organization, Department of Nutrition for Health and Development.

52. Darmon N & Drewnowski A (2008) Does social class predict diet quality? *The American Journal of Clinical Nutrition* **87**, 1107–1117.

53. Shohaimi S, Bingham S, Welch A, et al. (2004) Occupational social class, educational level and area deprivation independently predict plasma ascorbic acid concentration: a cross-sectional population based study in the Norfolk cohort of the European Prospective Investigation into Cancer (EPIC-Norfolk). *Eur J Clin Nutr* **58**, 1432–1435.

54. Hulshof KFAM, Brussaard JH, Kruizinga AG, et al. (2003) Socio-economic status, dietary intake and 10 y trends: the Dutch National Food Consumption Survey. *Eur J Clin Nutr* **57**, 128–137.

55. Ghiasvand R, Khosravi Z, Mirzaeian S, et al. (2013) Assessing the micronutrient and macronutrient intakes in female students and comparing them with the set standard values. *J Edu Health Promot* **2**, 1.

56. Šatalić Z, Colić Barić I & Keser I (2007) Diet quality in Croatian university students: Energy, macronutrient and micronutrient intakes according to gender. *International Journal of Food Sciences and Nutrition* **58**, 398–410.

57. Winzenberg TM, Riley M, Frendin S, et al. (2005) Sociodemographic factors associated with calcium intake in premenopausal women: a cross-sectional study. *Eur J Clin Nutr* **59**, 463–466.

58. Tarasuk VS & Beaton GH (1999) Women's Dietary Intakes in the Context of Household Food Insecurity. *The Journal of Nutrition* **129**, 672–679.

59. McIntyre L, Glanville NT, Raine KD, et al. (2003) Do low-income lone mothers compromise their nutrition to feed their children? *Cmal* **168**, 686–691.

60. Yau A, White M, Hammond D, et al. (2020) Socio-demographic characteristics, diet and health among food insecure UK adults: cross-sectional analysis of the International Food Policy Study. *Public Health Nutr.*, 1–13.

61. Anses (2015) *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'évaluation des apports en vitamines et minéraux issus de l'alimentation non enrichie, de l'alimentation enrichie et des compléments alimentaires dans la population française : estimation des apports usuels, des prévalences d'inadéquation et des risques de dépassement des limites de sécurité*. Maisons-Alfort, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety.

62. Pouchieu C, Andreeva VA, Péneau S, et al. (2013) Sociodemographic, lifestyle and dietary correlates of dietary supplement use in a large sample of French adults: results from the NutriNet-Santé cohort study. *Br J Nutr* **110**, 1480–1491.

63. Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, et al. (2018) Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature* **562**, 519–525.

64. Willett W, Rockström J, Loken B, et al. (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet* **393**, 447–492.

Supplementary Material

Supplemental Method 1. Selection of nutrients and reference values to calculate the SecDiet score.

Nutrients included:

Vitamin A: Vitamin A is essential to ensure normal vision, growth and development. The main outcome related to vitamin A deficiency is xerophtalmia, which in the most extreme case can lead to irreversible blindness. IOM and EFSA have set their recommendations based on the intake necessary to ensure adequate stores[1–3]. Only the WHO has defined a minimum daily intake necessary to prevent xerophtalmia, in the absence of clinical or subclinical infection, without ensuring liver storage. This mean requirement has been estimated as 300µg RE/day for men and 270µg/day for women[4]. These reference values were used as the deficiency threshold (DT) for vitamin A, with a CV of 15%.

Thiamin: Thiamin is an essential vitamin because of its role as a coenzyme in the metabolism of carbohydrates and branched-chain amino acids. Thiamin deficiency manifests itself in the form of beriberi disease or as Wernicke-Korsakoff syndrome. Reference values are mainly based on erythrocyte transketolase activity, which is used as a marker of thiamin status[1–3,5]. However, these reference values do not involve the onset of deficiency symptoms, so we defined an estimated deficiency threshold (eDT). This eDT was calculated as the intake covering the requirements of 2.5% of the population and is therefore estimated as $eDT = EAR(1 - 2CV) = RDA\frac{1-2CV}{1+2CV}$. The EFSA has set the EAR at 0.3mg/1000kcal/day and the RDA at 0.4mg/1000kcal/day with a CV of 20%[1]. The eDT is therefore set at 0.18mg/1000kcal/day. This threshold is quite consistent with studies that observed clinical signs of deficiency at intakes below 0.2 mg/1000kcal, as reported by the NCM[5].

Riboflavin: Riboflavin is a precursor of coenzymes that acts in numerous oxidation-reduction reactions in metabolic pathways and energy production. The clinical signs of riboflavin deficiency, ariboflavinosis, are nonspecific, and can take different forms such as a sore throat, cheilosis, angular stomatitis, etc. An adequate riboflavin intake has been determined using different indicators such as urinary riboflavin excretion, erythrocyte glutathione reductase activity coefficient or plasma riboflavin[2–5]. The EFSA used the inflection point of the urinary riboflavin excretion curve, which is a sign of body saturation, and set the EAR at 1.3 mg/day and the RDA at 1.6 mg/day with a CV of 10%[1]. In the same way as for thiamin, reference values were not set at the onset of clinical signs of deficiency and an eDT was calculated and set at 1.0 mg/day using EFSA reference values.

Niacin: Niacin is a precursor of the coenzymes involved in the metabolism of glucose, amino acids and fatty acids. Pellagra is the disease that appears in case of niacin deficiency. Niacin requirements are estimated using the urinary excretion of niacin metabolites and are expressed

as niacin equivalent to take account of the conversion of tryptophan into niacin[2,3,5]. The EFSA based its reference values using depletion-repletion studies and set the EAR at 1.3 mg NE/MJ (5.5 mg NE/1000kcal), based on the rationale that this intake is sufficient to prevent depletion and maintain niacin body stores. Assuming a CV of 10%, the RDA was set at 1.6 mg NE/MJ (6.6 mg NE/1000kcal). The EFSA also noted that there were no signs of niacin deficiency with intakes of at least 1 mg/NE/MJ (4.4 mg NE/1000kcal) for a minimal daily energy intake of 8.4 MJ/day (2000kcal/day)[1]. Since the reference values were not based on the appearance of clinical signs of deficiency, an eDT was estimated, based on the EFSA reference values, and set at 1.0 mg/NE/MJ (4.35 mg/1000kcal), which is in line with the minimum intake indicated by EFSA and NCM[1,5].

Folate: Folate acts as a coenzyme in the metabolism of nucleic and amino acids and is also fundamental for the normal functioning of the methionine cycle. The main clinical sign of folate deficiency in adults is megaloblastic anaemia. In pregnant women, folate intakes need to be increased to reduce risk of neural tube defects. The requirements for folate are based on the minimum amounts needed to maintain adequate levels of biomarkers such as serum or erythrocyte folates or plasma homocysteine[1,2,4]. Since the reference values were not based on the appearance of clinical signs of deficiency, an eDT was estimated based on the EFSA reference values. The EFSA has set an EAR of 250 µg/day and a RDA of 330 µg/day with a CV of 15%, based on a depletion-repletion study[1]. The eDT was therefore set at 175 µg/day.

Vitamin B12: Vitamin B12 plays an essential role in normal blood formation and neurological function. It acts as a coenzyme in the reaction that converts homocysteine to methionine and is also implicated in the metabolism of fatty acids and amino acids. The earliest symptom of vitamin B12 deficiency is similar to that of folate deficiency and takes the form of megaloblastic anaemia, but additional neurological dysfunction may eventually occur. The requirements for vitamin B12 are based on evaluating several biomarkers of vitamin B12 status[1–3]. The NNR determined that the lowest dietary intake needed to prevent anaemia is 1 µg/day[5] and this value was selected as the threshold for the calculation of the SecDiet, with a CV of 15%.

Vitamin C: Vitamin C acts as an enzyme cofactor and antioxidant. The clinical form of vitamin C deficiency is scurvy and occurs with a body pool lower than 300 mg and a plasma ascorbate concentration lower than 11 µmol/L. Scurvy can be prevented by an intake of 10 mg/day of vitamin C[1,2,4]. This value was selected as the threshold for the calculation of the SecDiet with a CV of 10% (CV assumed by the EFSA[1]).

Iodine: Iodine is an essential component for the synthesis of thyroid hormones which are crucial for numerous physiological functions (growth, development of neurological and cognitive functions, protein synthesis, etc.). The consequence of iodine deficiency is impaired thyroid function that may lead to thyroid hypertrophy resulting in goitre, mental retardation or cretinism.

Iodine requirements are mainly based on thyroid iodine accumulation and turnover[1–3]. The EFSA has defined an Adequate Intake based on the prevalence of goitre. A European epidemiological study found that the lowest prevalence of goitre was observed with a urinary iodine concentration above 100 µg/L, which corresponds to an iodine intake at around 150 µg/day. An Adequate Intake of 150 µg/day was thus defined for adults[1]. The Adequate Intake was taken as the deficiency threshold, with a CV of 20%. However, it appears that this threshold overestimated the risk of iodine deficiency so, using the national prevalence of goitre (which is approximately 10% in France[6]), we readjusted the estimation of the risk of deficiency (by dividing the deficiency threshold by an adequate factor of 1.5) in order to obtain a probability of adequacy of 0.9 in the French national representative survey INCA3. The recalibrated DT was therefore set at 100 µg/day with a CV of 20%.

Selenium: Selenium, via selenoproteins, plays a role, among others, in the metabolism of thyroid hormones and in the defences against oxidative stress. Selenium requirements are defined as the intake needed to maximize the activity of plasma selenoprotein glutathione peroxidase[2,3]. Selenium deficiency leads to Keshan disease, which was first observed in Chinese regions where soil selenium concentrations are low. Epidemiological studies were used to establish a population basal requirement for selenium and concluded that Keshan disease was not present in regions where the mean intake of selenium for adults was higher than 19.1 µg/day for males and 13.3 µg/day for females. These thresholds were adapted to use a standard reference body weight of 65 kg for men and 55kg for women. The population minimum intake of selenium defined by the FAO is therefore 21 µg/day for males and 16 µg/day for females[4,7], and this was taken as the reference for the SecDiet with a CV of 15%.

Iron: Most of the body's iron reserves are found in hemoglobin and muscle myoglobin and contribute to oxygen transport. Iron deficiency causes anaemia, which is the most common nutritional deficiency worldwide, and corresponds to low haemoglobin concentrations. Iron deficiency can also lead to depleted stores when serum ferritin concentrations are low. Iron intake requirements are based on the modelling of obligatory losses while taking account of iron absorption[1,2]. Although the requirements are not based on iron deficiency, we considered that those based on obligatory losses were adequate to define the deficiency threshold. We therefore considered the Anses recommendations that are based on the modeling of obligatory losses but applied to bioavailable iron. For men and non-menstruating women, an EAR of 6 mg/d, RDA of 11 mg/d and CV of 40% defined by Anses were therefore used for iron[3]. Assuming iron absorption of 16%, the EAR and RDA correspond respectively to 0.95 mg/day and 1.74 mg/day of bioavailable iron. The deficiency threshold was therefore set at 1.74 mg/d of bioavailable iron, with a CV of 40%. For menstruating women, the distribution of their requirements is not normal and was modelled using a lognormal function by adding basal iron losses (normally distributed) to menstrual losses (exponentially distributed, $\lambda=\ln(2)/0.28$) with a Monte-Carlo simulation on 1000 individuals in the same way as the calculation of the PANDiet[8]. Since the combination of basal and menstrual losses followed a lognormal distribution, it was considered that the logarithm of physiological requirements followed a normal distribution ($\mu=0.18$, $\sigma=0.34$). As for iodine, the

threshold used overestimated the risk of iron deficiency, so based on the prevalence of anaemia in the French population (2% among men and 5.1% among women[9]) we readjusted it by dividing by a factor of 2.5 for men and non-menstruating women and 2.8 for menstruating women in order to obtain a probability of adequacy of 0.98 for men and 0.95 for women in the French national representative survey INCA3. The corrected DT was set at 0.70 mg/day with a CV of 40% for men and non-menstruating women. For menstruating women, the DT was set at 0.83 mg/day.

Bioavailable iron was estimated using a mathematical model. Nonhaeme iron absorption is dependent on individual concentration of serum ferritin and on dietary factors such as vitamin C, meat, fish and poultry, tea, phytate and calcium intakes. Haeme iron absorption is only dependent on serum ferritin levels. The following equation was used to calculate nonhaeme iron absorption[10]:

$$\begin{aligned}\text{Ln Absorption } (\%) \\ &= 6.294 - 0.709 \ln(\mathrm{SF}) + 0.119 \ln(\mathrm{C}) + 0.006 \ln(\mathrm{MFP} + 0.1) \\ &- 0.055 \ln(T + 0.1) - 0.247 \ln(P) - 0.137 \ln(Ca) - 0.083 \ln(NH)\end{aligned}$$

For haeme iron absorption, the following equation was used [11]:

$$Log\ Absorption\ (\%) = 1.9897 - 0.3092 \times \log(\mathrm{SF})$$

where SF is serum ferritin (mg/L), C is vitamin C (mg), MFP is meat, fish, and poultry (g), T is tea (number of cups), P is phytate (mg), Ca is calcium (mg), and NH is nonhaeme iron (mg).

Because no data were available on the serum ferritin status of individuals, the serum ferritin level was set at 15 mg/L corresponding to the cut-off value for low ferritin stores. However, this hypothesis overestimates the absorption, since iron absorption is maximal at low ferritin stores.

Zinc: Zinc is essential for growth and development and has a catalytic role in various enzymatic processes. There are no specific clinical signs of deficiency in adults but skin lesions, diarrhoea, alopecia, impaired immune system may appear. In children, growth retardation is the main clinical sign. A vegetarian diet may lead to low zinc status because of the high content in plant-based foods of phytates that reduce zinc absorption. There are no adequate biomarkers for zinc status from which to derive requirements. Zinc requirements were thus estimated using a factorial approach considering physiological requirements, by estimating total daily losses and zinc absorption[1,2,4,12]. We estimated the deficiency threshold for bioavailable zinc from estimates of obligatory losses. For men, urinary and sweat losses, integumental losses and losses in semen are estimated respectively at 0.63 mg/d, 0.54 mg/d and 0.1 mg/d. For women, urinary and sweat losses, integumental losses and menstrual losses are estimated respectively at 0.44 mg/d, 0.46 mg/d and 0.1 mg/d[5,13]. Losses from the intestine could not be precisely determined because they depend on the quantity of zinc absorbed, and this was estimated to be 0.3 mg/d. It was therefore considered that total endogenous losses reached 1.6 mg/d for men and 1.3 mg/d for women and these two values were retained to define the deficiency threshold, with a CV of 15%.

The following mathematical model was used to calculate bioavailable zinc from dietary zinc and phytate intakes[14] :

$$TAZ = 0.5 \times \left\{ 0.13 + TDZ + 0.10\left(1 + \frac{TDP}{1.2}\right) - \sqrt{\left(0.13 + TDZ + 0.10(1 + \frac{TDP}{1.2})\right)^2 - 4 \times 0.13 \times TDZ} \right\}$$

TAZ: total absorbed zinc (mmol), TDZ: total dietary zinc (mmol) and TDP: total dietary phytate (mmol).

Calcium: Calcium is an essential and structural component of the skeleton and more than 99 percent of total body calcium is present in the bones and teeth. When intakes are inadequate, calcium is resorbed from the skeleton in order to maintain normal circulating concentrations, making it difficult to estimate calcium nutritional status and requirements. On the long term, this resorption reduces bone mineral density and chronic calcium deficiency can lead to osteopenia and osteoporosis and an increased risk of fractures. Calcium requirements are difficult to estimate because of calcium homeostasis and the absence of short-term clinical manifestations of calcium deficiency. Health agencies have therefore based their requirements on balanced studies[1,2,12]. Over the long term, it is assumed that intake should not be lower than 500 mg/d for adults to maintain a consistent balance[5,12] and several meta-analyses have concluded that there was no significant association between calcium intake and fracture risk with a calcium intake higher than 500 mg/d[15–17]. This value of 500 mg/d was retained for our study to define the deficiency threshold, with a CV of 15%.

Nutrients not included:

Pantothenic acid: Pantothenic acid is widely found in foods and isolated pantothenic acid deficiency has almost never been observed, except under experimental conditions[2,4,12].

Vitamin B6: Vitamin B6 is frequently found in foods and vitamin B6 deficiency is extremely rare; it has only been observed during depletion with very low level of vitamin B6 or in association with other B-vitamin deficiencies[2,4,12].

Vitamin B8: No deficiency has been observed in healthy humans under normal conditions but only in individuals receiving total parenteral nutrition without biotin or those consuming raw egg whites over a long period[2,4,12].

Vitamin D: Vitamin D deficiency can occur in the form of rickets in children and osteomalacia in adults. Despite its fundamental role in human metabolism, vitamin D was not considered for the calculation of the SecDiet because it can be synthesized endogenously in adequate quantities through exposure to the sun and the requirements are generally determined based on low sun exposure[1,3,12]. It would therefore be inaccurate to evaluate the risk of vitamin D deficiency by only considering food intake, so it was not included in the SecDiet.

Vitamin E: Vitamin E deficiency is very rare and has only been observed in individuals with medical conditions that alter its absorption or metabolism. Vitamin E deficiency due to a low intake has never been described in healthy individuals[2,4,5].

Vitamin K: Vitamin K plays a role in blood coagulation. Vitamin K deficiency can be found in infants that are exclusively breast-fed and can cause bleeding, but has not been observed in adults, except when a pathology interferes with absorption of the vitamin[2,4,12].

Copper: Copper deficiency is rare in humans and has only been observed in patients receiving prolonged total parenteral nutrition, in the case of genetic mutations affecting copper metabolism[1,2] or in patients who have undergone bariatric surgery[18].

Manganese: Clinical signs of manganese deficiency have not been clearly described in humans and it has only been observed in few cases of patients receiving parenteral nutrition[1,2,12].

Phosphorus: Phosphorus is widespread in foods. Phosphorus deficiency is unlikely to be caused by an inadequate phosphorus intake, but only in the event of metabolic disorders or in patients receiving parenteral nutrition[1,2,12].

Potassium: Potassium is found in all foods and potassium deficiency is not caused by an inadequate potassium intake but can be caused by increased potassium losses (diarrhea, vomiting, abuse of laxatives and diuretics)[1,12].

Sodium: Sodium deficiency is rare in healthy adults. Nowadays there are more concerns about excess intakes rather than insufficient intakes[2,12,19].

Magnesium: Magnesium deficiency may be observed in some diseases or with chronic alcoholism, or in the case of a low magnesium intake combined with important losses (prolonged diarrhea, excessive urinary magnesium losses) but otherwise overt deficiency is not common in healthy adults[2,4,12].

Chromium: There is insufficient scientific evidence of how essential chromium is in humans; chromium deficiency has only been observed in patients receiving total parenteral nutrition without chromium supplementation[1,2].

Fluoride: Fluoride plays an important role in the prevention of caries and an insufficient fluoride intake increases the risk of dental caries. However, fluoride is not considered as an essential nutrient[1,2].

Molybdenum: Molybdenum deficiency has not been observed in healthy humans[1,2].

Supplemental Method 2. The PANDiet score is expressed as the average of an adequacy subscore (AS – accounting for 27 nutrients) and a moderation subscore (MS – accounting for six nutrients, plus 12 potential penalty values). DHA and EPA+DHA are weighted by a factor of 1/2 as DHA is present twice. Niacin equivalents were calculated as the sum of dietary niacin and 1/60 dietary tryptophan. The upper reference value for sugars excludes lactose. The tolerable upper intake limit for vitamin A concerns retinol only. Version 3.1 of the PANDiet is based on the dietary reference intake from the 2016 Anses opinion[3] and the overall construction of the score has been described elsewhere[20,21].

PANDiet score
Average of Adequacy and Moderation subscores

Adequacy subscore			
Nutrient	**Reference value (/day)**	**Variability**	**Source**
Protein	0.66 or 0.8 g/kg bw	12.5%	[22,23]
LA	3.08% EIEA	15%	[24]
ALA	0.769% EIEA	15%	[24]
DHA	0.192 g	15%	[24]
EPA + DHA	0.385 g	15%	[24]
Fibre	23 g	15%	[3]
Vitamin A	570 or 490 µg	15%	[3]
Thiamin	0.3 mg/1000 kcal	20%	[1]
Riboflavin	1.3 mg	10%	[1]
Niacin	5.44 mg NE/1000kcal	10%	[3]
Pantothenic acid	3.62 or 2.94 mg	30%	[3]
Vitamin B-6	1.5 or 1.3 mg	10%	[25]
Folate	250 µg	15%	[3]
Vitamin B-12	3.33 µg	10%	[3]
Vitamin C	90 mg	10%	[3]
Vitamin D	10 µg	25%	[3]
Vitamin E	5.8 or 5.5 mg	40%	[3]
Calcium	860 (<= 24 y.o) or 750 (>24 y.o.)	15% or 13%	[3]
Copper	1.0 or 0.8 mg	15%	[3]
Iodine	107 µg	20%	[3]
Bioavailable iron	See Supplemental Method 1		[3]
Magnesium	5 mg/kg bw	15%	[3]
Manganese	1.56 or 1.39 mg	40%	[3]
Phosphorus	Calcium (mmol) / 1.65 c.f. phosphorus section in de Gavelle et al. [8]	7.5% + CV Calcium (mg)	[1]
Potassium	2692 mg	15%	[1]
Selenium	54 µg	15%	[3]
Bioavailable zinc	0.642 + 0.038 b.w.	10%	[3]

Moderation subscore			
Nutrient	**Reference value (/day)**	**Variability**	**Source**
Protein	2.2 g/kg bw	12.5%	[3]
Total fat	44% EIEA	5%	[3]
SFA	12% EIEA	15%	[3]
Carbohydrates	60.5% EIEA	5%	[3]
Sugars	100 g	15%	[3]
Sodium	3482 or 2618 mg	40%	[3]

Tolerable Upper Intake Limits		Source
Vitamin A	3000 µg	[3]
Niacin	900 mg	[3]
Vitamin B6	25 mg	[3]
Folate	1170 µg	[3]
Vitamin D	100 µg	[3]
Vitamin E	300 mg	[3]
Calcium	2500 mg	[3]
Copper	10 mg	[3]
Iodine	600 µg	[3]
Dissociable magnesium	250 mg	[3]
Selenium	300 µg	[3]
Zinc	25 mg	[3]

bw, body weight; LA, linoleic acid; EIEA, energy intake excluding alcohol; ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; NE, niacin equivalent; CV, coefficient of variation; SFA, saturated fatty acids.

Supplemental Table 1: Spearman rank correlation coefficients (r) between the SecDiet score and its probabilities of adequacy, the PANDiet score and total energy intake in the French adult population, INCA3, n=1,774.

	SecDiet score	Calcium	Zinc	Iron	Selenium	Iodine	Vitamin C	Vitamin B12	Folate	Niacin	Riboflavin	Thiamin	Vitamin A
Probabilities of adequacy													
Vitamin A	0.68† (0.65, 0.70) **	0.43 (0.39, 0.47) **	0.31 (0.27, 0.35) **	0.21 (0.17, 0.26) **	0.26 (0.21, 0.30) **	0.40 (0.36, 0.44) **	0.24 (0.19, 0.28) **	0.27 (0.23, 0.32) **	0.48 (0.44, 0.51) **	0.07 (0.03, 0.12) *	0.44 (0.40, 0.48) **	0.10 (0.05, 0.14) **	1
Thiamin	0.17 (0.13, 0.22) **	0.13 (0.08, 0.17) **	0.08 (0.03, 0.12) *	0.11 (0.06, 0.15) **	0.09 (0.04, 0.14) *	0.15 (0.11, 0.20) **	0.15 (0.10, 0.19) **	0.06 (0.01, 0.11) *	0.16 (0.12, 0.21) **	0.18 (0.13, 0.23) **	0.16 (0.12, 0.21) **	1	
Riboflavin	0.74 (0.71, 0.76) **	0.64 (0.61, 0.66) **	0.52 (0.48, 0.55) **	0.42 (0.38, 0.45) **	0.38 (0.34, 0.42) **	0.61 (0.58, 0.64) **	0.29 (0.25, 0.33) **	0.46 (0.42, 0.49) **	0.56 (0.53, 0.59) **	0.17 (0.12, 0.21) **	1		
Niacin	0.20 (0.16, 0.25) **	0.14 (0.09, 0.18) **	0.14 (0.09, 0.19) **	0.20 (0.15, 0.24) **	0.09 (0.05, 0.14) **	0.17 (0.13, 0.22) **	0.11 (0.07, 0.16) **	0.12 (0.07, 0.16) **	0.15 (0.10, 0.19) **	1			
Folate	0.70 (0.68, 0.73) **	0.49 (0.45, 0.52) **	0.37 (0.33, 0.41) **	0.40 (0.36, 0.44) **	0.37 (0.32, 0.40) **	0.53 (0.49, 0.56) **	0.43 (0.39, 0.46) **	0.31 (0.27, 0.35) **	1				
Vitamin B12	0.51 (0.48, 0.55) **	0.38 (0.34, 0.42) **	0.48 (0.44, 0.51) **	0.33 (0.28, 0.37) **	0.28 (0.24, 0.32) **	0.36 (0.32, 0.40) **	0.14 (0.09, 0.18) **	1					
Vitamin C	0.42 (0.38, 0.46) **	0.24 (0.20, 0.28) **	0.21 (0.17, 0.25) **	0.30 (0.26, 0.34) **	0.24 (0.19, 0.28) **	0.25 (0.21, 0.29) **	1						
Iodine	0.78 (0.76, 0.79) **	0.58 (0.55, 0.61) **	0.40 (0.36, 0.44) **	0.38 (0.34, 0.42) **	0.38 (0.34, 0.42) **	1							
Selenium	0.41 (0.37, 0.45) **	0.35 (0.31, 0.39) **	0.27 (0.22, 0.31) **	0.21 (0.16, 0.25) **	1								
Iron	0.51 (0.48, 0.55) **	0.30 (0.26, 0.34) **	0.51 (0.47, 0.54) **	1									
Zinc	0.54 (0.50, 0.57) **	0.49 (0.45, 0.52) **	1										
Calcium	0.70 (0.68, 0.73) **	1											
Total energy intake	0.44 (0.40, 0.47) **												
PANDiet score	0.50 (0.46, 0.53) **												

† Spearman rank correlation coefficient with 95% confidence interval. *, P<0.05; **, P<0.001

Supplemental Table 2: The SecDiet score and its probabilities of adequacy according to monthly income per household unit in the French adult population from the INCA3 survey, n=1,774

	Monthly income per household unit (€)										
	>1850 € (n=607)		1340-1850 € (n=402)		900-1340 € (n=355)		<900 € (n=281)		Not available (n=129)		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	*P*†
SecDiet (0-1)	0.94	0.07	0.93	0.08	0.92	0.10	0.91	0.11	0.93	0.07	
Median	0.97		0.96		0.96*		0.95*		0.96*		0.002
Q1-Q3	0.93-0.99		0.91-0.99		0.89-0.99		0.87-0.99		0.89-0.99		
PANDiet (0-100)	64.96	4.83	64.60	5.85	64.08	6.00	64.05	7.33	63.63	5.41	
Median	65.09		64.45		64.81		64.14		63.90		0.058
Q1-Q3	61.70-68.17		60.95-68.71		59.96-68.27		59.60-68.72		58.58-66.78		
Probabilities of adequacy for SecDiet (0-1)											
Vitamin A	0.92	0.14	0.91	0.15	0.90	0.19	0.84	0.27	0.91	0.15	-
Thiamin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.00	-
Riboflavin	0.96	0.10	0.95	0.12	0.93	0.16	0.93	0.14	0.94	0.08	-
Niacin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.00	1.00	0.02	1.00	0.00	-
Folate	0.96	0.10	0.95	0.10	0.92	0.17	0.94	0.13	0.92	0.14	-
Vitamin B12	0.98	0.04	0.97	0.06	0.97	0.06	0.97	0.06	0.97	0.04	-
Vitamin C	0.98	0.05	0.97	0.05	0.97	0.05	0.97	0.06	0.97	0.05	-
Iodine	0.91	0.15	0.90	0.15	0.90	0.16	0.89	0.18	0.92	0.11	-
Selenium	0.99	0.02	0.99	0.02	0.99	0.03	0.99	0.03	0.99	0.03	-
Iron	0.97	0.05	0.96	0.08	0.96	0.07	0.96	0.08	0.97	0.04	-
Zinc	0.99	0.04	0.99	0.06	0.98	0.05	0.98	0.06	0.99	0.04	-
Calcium	0.96	0.09	0.95	0.12	0.94	0.15	0.9	0.21	0.92	0.13	-

* Significantly different from the reference (“>1850 €”), assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons; significant at P<0.05.
† P for Kruskal-Wallis non-parametric test.

Supplemental Table 3: The SecDiet score and its probabilities of adequacy according to monthly income per household unit in the French adult population from the NutriNet-Santé study, n=104,382.

	Monthly income per household unit (€)																
	>3700 € (n=9938)		2700 - 3700 € (n=14 382)		2300 - 2700 € (n=9129)		1800 - 2300 € (n=14 986)		1200 - 1800 € (n=25 632)		900 - 1200 € (n=6740)		<900 € (n=11277)		Not available (n=12297)		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	*P*†
SecDiet (0-1)	0.97	0.05	0.97	0.05	0.97	0.05	0.96	0.06	0.96	0.06	0.95	0.07	0.94	0.08	0.95	0.07	
Median	0.99		0.99		0.98*		0.98*		0.98*		0.98*		0.97*		0.98*		<0.001
Q1-Q3	0.97-1.00		0.96-1.00		0.96-1.00		0.96-1.00		0.95-0.99		0.94-0.99		0.91-0.99		0.94-0.99		
PANDiet (0-100)	62.50	6.96	61.99	7.00	61.52	7.03	61.26	7.24	60.31	7.14	59.47	7.14	59.31	7.55	60.94	7.49	
Median	61.99		61.36*		60.86*		60.60*		59.73*		58.82*		58.64*		60.39*		<0.001
Q1-Q3	57.54-67.02		57.04-66.47		56.64-65.97		56.25-65.83		55.36-64.76		54.41-63.83		53.99-63.99		55.75-65.71		
Probabilities of adequacy for SecDiet (0-1)																	
Vitamin A	0.99	0.05	0.99	0.05	0.98	0.05	0.98	0.05	0.98	0.06	0.98	0.06	0.97	0.09	0.98	0.07	-
Thiamin	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	-
Riboflavin	0.98	0.09	0.98	0.10	0.97	0.10	0.97	0.11	0.96	0.12	0.95	0.14	0.93	0.17	0.95	0.15	-
Niacin	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.02	1.00	0.03	1.00	0.03	1.00	0.03	-
Folate	0.98	0.07	0.98	0.07	0.98	0.08	0.97	0.09	0.97	0.11	0.95	0.13	0.94	0.15	0.96	0.12	-
Vitamin B12	0.98	0.06	0.98	0.06	0.98	0.06	0.98	0.07	0.98	0.07	0.98	0.07	0.97	0.11	0.97	0.09	-
Vitamin C	1.00	0.02	0.99	0.03	0.99	0.03	0.99	0.03	0.99	0.03	0.99	0.04	0.98	0.05	0.99	0.04	-
Iodine	0.90	0.16	0.89	0.17	0.88	0.18	0.88	0.19	0.86	0.20	0.84	0.22	0.81	0.25	0.84	0.22	-
Selenium	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00	0.01	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00	0.03	1.00	0.02	-
Iron	0.99	0.03	0.99	0.03	0.99	0.04	0.99	0.04	0.99	0.04	0.99	0.05	0.98	0.06	0.99	0.05	-
Zinc	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00	0.02	1.00	0.03	1.00	0.03	0.99	0.03	1.00	0.03	-
Calcium	0.98	0.08	0.98	0.09	0.98	0.09	0.97	0.09	0.97	0.11	0.96	0.12	0.94	0.14	0.96	0.12	-

* Significantly different from the reference (“>3700€”), assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons; significant at P<0.05.

† P for Kruskal-Wallis non-parametric test.

Supplemental Table 4: The SecDiet score and its probabilities of adequacy according to professional situation in the French adult population from the INCA3 survey, n=1,774

	Professional situation						
	Other occupations (n=1600)		Unemployed people (n=112)		Students (n=62)		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	*P*†
SecDiet (0-1)	0.93	0.09	0.91	0.09	0.92	0.11	<0.001
Median	0.97		0.93*		0.95		
Q1-Q3	0.91-0.99		0.86-0.98		0.88-0.99		
PANDiet (0-100)	64.66	5.63	62.72	7.24	63.11	6.49	<0.001
Median	64.92		61.06*		64.36*		
Q1-Q3	60.89-68.74		59.06-66.92		59.43-67.72		
Probabilities of adequacy for SecDiet (0-1)							
Vitamin A	0.90	0.17	0.87	0.19	0.83	0.31	-
Thiamin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	-
Riboflavin	0.94	0.12	0.94	0.10	0.92	0.14	-
Niacin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.00	-
Folate	0.95	0.12	0.90	0.18	0.92	0.17	-
Vitamin B12	0.97	0.06	0.98	0.04	0.98	0.04	-
Vitamin C	0.97	0.05	0.97	0.05	0.97	0.07	-
Iodine	0.90	0.15	0.88	0.16	0.90	0.19	-
Selenium	0.99	0.02	0.99	0.03	1.00	0.02	-
Iron	0.96	0.07	0.96	0.06	0.98	0.04	-
Zinc	0.98	0.05	0.99	0.03	0.99	0.02	-
Calcium	0.94	0.12	0.89	0.24	0.92	0.20	-

* Significantly different from the reference ("Others occupations"), assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons; significant at P<0.05.
† P for Kruskal-Wallis non-parametric test.

Supplemental Table 5: The SecDiet score and its probabilities of adequacy according to professional situation in the French adult population from the NutriNet-Santé study, n=104,382.

	Professional situation						
	Other occupations (n=89 238)		Unemployed people (n=6371)		Students (n=8773)		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	*P*†
SecDiet (0-1)	0.96	0.06	0.94	0.08	0.93	0.08	<0.001
Median	0.98		0.97*		0.97*		
Q1-Q3	0.95-0.99		0.93-0.99		0.91-0.99		
PANDiet (0-100)	61.18	7.20	59.62	7.49	59.05	7.33	<0.001
Median	60.58		59.05*		58.39*		
Q1-Q3	56.15-65.75		54.34-64.27		53.95-63.36		
Probabilities of adequacy for SecDiet (0-1)							
Vitamin A	0.98	0.06	0.98	0.07	0.97	0.09	-
Thiamin	1.00	0.00	1.00	0.01	1.00	0.00	-
Riboflavin	0.97	0.11	0.95	0.15	0.92	0.18	-
Niacin	1.00	0.02	1.00	0.03	1.00	0.03	-
Folate	0.97	0.10	0.95	0.14	0.94	0.15	-
Vitamin B12	0.98	0.07	0.97	0.11	0.97	0.10	-
Vitamin C	0.99	0.03	0.99	0.05	0.99	0.04	-
Iodine	0.87	0.19	0.83	0.23	0.8	0.25	-
Selenium	1.00	0.02	1.00	0.03	1.00	0.03	-
Iron	0.99	0.04	0.98	0.05	0.98	0.06	-
Zinc	1.00	0.02	1.00	0.03	0.99	0.04	-
Calcium	0.97	0.10	0.95	0.13	0.95	0.14	-

* Significantly different from the reference ("Others occupations"), assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons; significant at P<0.05.
† P for Kruskal-Wallis non-parametric test.

Supplemental Table 6: The SecDiet score and its probabilities of adequacy according to perception of financial situation in the French adult population from the INCA3 survey, n=1,774

	Perception of financial situation														
	Financially comfortable (n=298)		It's okay (n=663)		It's tight (n=195)		Manageable if careful (n=496)		Hard to make ends meet (n=102)		Can't manage without debts (n=19)		Refusal to answer (n=1)		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	*P*†
SecDiet (0-1)	0.94	0.08	0.94	0.06	0.92	0.09	0.92	0.10	0.89	0.14	0.85	0.14	0.96	.	<0.001
Median	0.97		0.97		0.96		0.96		0.93*		0.95*		0.96		
Q1-Q3	0.92-0.99		0.92-0.99		0.89-0.99		0.89-0.99		0.86-0.97		0.81-0.97		-		
PANDiet (0-100)	65.31	5.19	64.56	5.40	64.26	5.18	64.09	6.23	63.55	8.00	63.36	7.55	54.25	.	<0.001
Median	65.16		64.90		64.19		64.84		63.12*		62.05		54.25		
Q1-Q3	61.45-68.90		60.27-68.62		6.116-67.68		60.06-68.27		59.16-67.53		54.71-72.00		-		
Probabilities of adequacy for SecDiet (0-1)															
Vitamin A	0.92	0.17	0.92	0.14	0.86	0.23	0.89	0.18	0.82	0.27	0.82	0.18	0.96	.	-
Thiamin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	0.99	0.01	1.00	.	-
Riboflavin	0.95	0.10	0.96	0.08	0.92	0.14	0.93	0.14	0.90	0.20	0.86	0.22	0.98	.	-
Niacin	1.00	0.01	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.02	1.00	0.01	1.00	0.00	1.00	.	-
Folate	0.94	0.14	0.96	0.08	0.95	0.09	0.93	0.14	0.90	0.22	0.84	0.18	0.95	.	-
Vitamin B12	0.97	0.06	0.98	0.04	0.97	0.05	0.97	0.06	0.96	0.08	0.94	0.11	1.00	.	-
Vitamin C	0.98	0.04	0.98	0.04	0.98	0.04	0.97	0.06	0.95	0.07	0.91	0.19	0.96	.	-
Iodine	0.90	0.18	0.91	0.14	0.91	0.13	0.90	0.15	0.87	0.20	0.80	0.19	0.96	.	-
Selenium	0.99	0.01	0.99	0.02	0.99	0.02	0.99	0.02	0.98	0.04	0.98	0.03	1.00	.	-
Iron	0.97	0.05	0.97	0.04	0.96	0.06	0.96	0.08	0.94	0.12	0.91	0.16	0.99	.	-
Zinc	0.99	0.04	0.99	0.03	0.98	0.06	0.98	0.06	0.97	0.07	0.91	0.17	1.00	.	-
Calcium	0.97	0.07	0.95	0.09	0.89	0.21	0.93	0.15	0.89	0.22	0.87	0.19	0.97	.	-

* Significantly different from the reference ("Financially comfortable €"), assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons; significant at P<0.05.
† P for Kruskal-Wallis non-parametric test.

Supplemental Table 7: The SecDiet score and its probabilities of adequacy according to food insufficiency status in the French adult population from the INCA3 survey, n=1,774

	Food insufficiency status						
	Food sufficiency (n=1512)		Qualitative food insufficiency (n=227)		Quantitative food sufficiency (n=35)		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	*P*†
SecDiet (0-1)	0.93	0.08	0.90	0.11	0.91	0.10	<0.001
Median	0.97		0.95*		0.95*		
Q1-Q3	0.91-0.99		0.87-0.98		0.88-0.96		
PANDiet (0-100)	64.67	5.71	63.37	6.13	61.51	6.08	<0.001
Median	64.92		62.59*		61.43*		
Q1-Q3	60.95-68.63		59.23-67.96		56.87-66.84		
Probabilities of adequacy for SecDiet (0-1)							
Vitamin A	0.90	0.17	0.84	0.24	0.90	0.14	-
Thiamin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	-
Riboflavin	0.95	0.12	0.91	0.17	0.93	0.12	-
Niacin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.00	-
Folate	0.94	0.12	0.92	0.16	0.93	0.17	-
Vitamin B12	0.97	0.05	0.96	0.07	0.97	0.05	-
Vitamin C	0.98	0.05	0.97	0.05	0.92	0.15	-
Iodine	0.90	0.15	0.89	0.15	0.89	0.18	-
Selenium	0.99	0.02	0.99	0.03	1.00	0.02	-
Iron	0.97	0.06	0.95	0.11	0.94	0.11	-
Zinc	0.99	0.05	0.98	0.07	0.98	0.07	-
Calcium	0.94	0.12	0.90	0.21	0.94	0.12	-

* Significantly different from the reference ("Food sufficiency"), assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons; significant at P<0.05.
† P for Kruskal-Wallis non-parametric test.

Supplemental Table 8: The SecDiet score and its probabilities of adequacy according to food security status in the French adult population from the INCA3 survey, n=1,774.

	Food security status						
	Food security (n=1654)		Moderate food insecurity (n=73)		Severe food insecurity (n=47)		
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	*P*[1]
SecDiet (0-1)	0.93	0.08	0.89	0.13	0.89	0.10	<0.001
Median	0.97		0.94*		0.89*		
Q1-Q3	0.91-0.99		0.82-0.99		0.88-0.95		
PANDiet (0-100)	64.53	5.73	63.07	6.00	62.72	7.28	0.002
Median	64.84		61.93*		60.78		
Q1-Q3	60.61-68.58		58.58-67.69		57.30-67.02		
Probabilities of adequacy for SecDiet (0-1)							
Vitamin A	0.90	0.18	0.84	0.24	0.81	0.19	-
Thiamin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	-
Riboflavin	0.95	0.12	0.90	0.17	0.91	0.12	-
Niacin	1.00	0.01	1.00	0.01	1.00	0.01	-
Folate	0.94	0.12	0.89	0.22	0.91	0.15	-
Vitamin B12	0.97	0.05	0.96	0.06	0.98	0.05	-
Vitamin C	0.97	0.05	0.96	0.05	0.95	0.13	-
Iodine	0.90	0.15	0.88	0.16	0.88	0.17	-
Selenium	0.99	0.02	0.98	0.05	0.99	0.02	-
Iron	0.97	0.06	0.93	0.11	0.95	0.11	-
Zinc	0.99	0.05	0.97	0.05	0.97	0.11	-
Calcium	0.94	0.14	0.92	0.15	0.91	0.13	-

* Significantly different from the reference ("Food security"), assessed by Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) test for pairwise multiple comparisons; significant at P<0.05.
[†] P for Kruskal-Wallis non-parametric test.

Supplemental References

1. EFSA (European Food Safety Agency) (2017) Dietary Reference Values for nutrients: Summary report. 92.

2. Otten JJ, Hellwig JP & Meyers LD (editors) (2006) *DRI, dietary reference intakes: the essential guide to nutrient requirements*. Washington, D.C: National Academies Press.

3. Anses (2016) *Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles.* Maisons-Alfort, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).

4. World Health Organization & Food and Agriculture Organization of the United Nations (editors) (2004) *Vitamin and mineral requirements in human nutrition*. 2nd ed. Geneva : Rome: World Health Organization ; FAO.

5. Nordic Council of Ministers (2014) *Nordic Nutrition Recommendations 2012: Integrating nutrition and physical activity.* Copenhagen: Nordic Council of Ministers.

6. Wémeau J-L (2010) Chapitre 8. Goitres simples et nodulaires. In *Les maladies de la thyroïde*. Masson.

7. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations & International Atomic Energy Agency (editors) (1996) *Trace elements in human nutrition and health*. Geneva: World Health Organization.

8. de Gavelle E, Huneau J-F & Mariotti F (2018) Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. *Nutrients* **10**, 226.

9. Equipe de Surveillance et d'épidémiologie nutritionnelle (ESEN) (2019) *Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (Esteban), 2014-2016. Volet Nutrition. Chapitre Dosages biologiques : vitamines et minéraux*. Saint-Maurice, France: Santé Publique France.

10. Armah SM, Carriquiry A, Sullivan D, et al. (2013) A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults. *The Journal of Nutrition* **143**, 1136–1140.

11. Hallberg L & Hulthén L (2000) Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. *The American Journal of Clinical Nutrition* **71**, 1147–1160.

12. Biesalski HK & Grimm P (2005) *Pocket atlas of nutrition*. Rev. translation of 3rd German ed. Stuttgart ; New York: Thieme.

13. Institute of Medicine (U.S.) & Panel on Micronutrients (2002) *Dietary reference intakes for vitamin A, vitamin K, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc*. Washington, D.C.: National Academy Press.

14. Miller LV, Krebs NF & Hambidge KM (2007) A Mathematical Model of Zinc Absorption in Humans As a Function of Dietary Zinc and Phytate. *The Journal of Nutrition* **137**, 135–141.

15. Wang D, Chen X-H, Fu G, et al. (2015) Calcium intake and hip fracture risk: a meta-analysis of prospective cohort studies. *Int J Clin Exp Med*.

16. Bolland MJ, Leung W, Tai V, et al. (2015) Calcium intake and risk of fracture: systematic review. *BMJ*, h4580.

17. Bischoff-Ferrari HA, Dawson-Hughes B, Baron JA, et al. (2007) Calcium intake and hip fracture risk in men and women: a meta- analysis of prospective cohort studies and randomized controlled trials1–3. *Am J Clin Nutr*.

18. Gletsu-Miller N & Wright BN (2013) Mineral Malnutrition Following Bariatric Surgery. *Advances in Nutrition* **4**, 506–517.

19. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens) (2019) Scientific Opinion on the dietary reference values for sodium. *EFSA Journal*.

20. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, et al. (2012) Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. *PLoS ONE* **7**, e42155 [Cameron DW, editor].

21. de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, et al. (2019) The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. *The Journal of Nutrition* **149**, 488–496.

22. Food and Agriculture Organization of the United Nations (editor) (2013) *Dietary protein quality evaluation in human nutrition: report of an FAO expert consultation, 31 March-2 April, 2011, Auckland, New Zealand*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

23. Anses (2019) *Anses Opinion on the updating of the PNNS dietary guidelines for women from menopause and men over 65 years of age*. Maisons-Alfort, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).

24. Anses (2011) *Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras.* Maisons-Alfort, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).

25. EFSA NDA Panel (EFSA Panel on Nutrition, Novel Foods and Food Allergens) (2016) Scientific opinion on Dietary Reference Values for vitamin B6. *EFSA Journal*.

2.4. Article n°4 : Substituer la viande ou les produits laitiers avec des substituts végétaux a des impacts faibles mais hétérogènes sur la qualité de l'alimentation et la sécurité nutritionnelle : une étude de simulation dans l'étude INCA3.

Résumé

Contexte : On observe depuis plusieurs années un développement important de produits végétaux de substitution à la viande et aux produits laitiers. Ces produits sont conçus pour avoir la même utilisation que les produits animaux et pourraient faciliter la transition vers un régime plus végétalisé. Cependant, il existe une grande diversité au sein de ces produits et leur qualité nutritionnelle a été peu étudiée.

Objectifs : Simuler des régimes de substitutions de la viande, du lait et des desserts lactés par des substituts végétaux et évaluer les effets sur la qualité nutritionnelle de l'alimentation.

Méthode : A partir des consommations alimentaires observées de 2121 adultes (18-79 ans) de l'étude INCA3 (2014-2015), nous avons simulé séparément la substitution de la viande, du lait ou des desserts lactés par la même quantité de substitut végétal. Nous avons réalisé une simulation différente pour chaque substitut végétal dont nous avions une composition nutritionnelle complète (56 substituts de viande et légumineuses, 16 boissons végétales et 24 desserts végétaux). La qualité de l'alimentation du régime observé et des régimes simulés a été évaluée avec le score PANDiet et la sécurité nutritionnelle a été évaluée avec le score SecDiet.

Résultats : Les impacts des substitutions varient à la fois en fonction de l'aliment substitué et du type de substitut utilisé. Les substituts à base de soja entraînent une légère augmentation du PANDiet (+0,8% comparé au régime initial dans le cas de la substitution de la viande), à l'inverse des substituts à base de céréales (-1,1% de PANDiet pour la substitution de la viande). En général, les substitutions augmentent les probabilités d'adéquations pour les fibres, acide linoléique, acide alpha-linolénique, vitamines E et B9, acides gras saturés et diminuent les probabilités pour les vitamines B2 et B12 mais également le fer et zinc absorbés dans le cas de la substitution de la viande, et le calcium et l'iode dans le cas de la substitution du lait ou desserts lactés. La baisse pour le calcium n'était pas observée avec les substituts enrichis en calcium. Concernant le risque de carence, il était augmenté pour la vitamine B2 et B12, pour le fer absorbé pour la substitution de la viande, et pour le calcium (sauf si substituts enrichis) et l'iode pour la substitution du lait ou des desserts lactés. Les substitutions entraînent une augmentation de la contribution des aliments ultra-transformés à l'apport énergétique de 29% dans les régimes observés à 27-40% dans les régimes simulés.

Conclusion : La substitution des produits animaux par des substituts végétaux a un impact faible sur la qualité globale de l'alimentation et la sécurité nutritionnelle mais hétérogène à l'échelle des nutriments. Les substituts à base de soja ou de légumes secs apparaissent plus adaptés que les autres pour remplacer les produits animaux.

Valorisation : Ce travail a été publié dans la revue *The Journal of Nutrition* (Volume 151, n°8, Août 2021). La version présentée ci-après n'est pas la version publiée, mais la version acceptée

pour publication dans *The Journal of Nutrition*, après examen par des pairs. La version, après travail d'édition, publiée, est disponible sur le lien suivant : https://doi.org/10.1093/jn/nxab146

Messages clés

- La qualité de l'alimentation globale est peu affectée par les substitutions mais entraîne un profil différent d'adéquation en nutriment.
- Les substitutions entraînent moins d'apports excessifs en acides gras saturés mais une consommation plus excessive de sodium lorsque l'on substitue la viande, et de sucre hors lactose lorsque l'on substitue le lait ou les desserts lactés.
- L'impact sur la qualité de l'alimentation varie largement selon le substitut utilisé. Les substituts à base de soja permettent le mieux de maintenir ou améliorer la qualité de l'alimentation lors de la substitution des produits animaux.
- Un risque de carence légèrement plus élevé est observé pour les vitamines B2 et B12 et le fer pour la substitution de la viande ; pour le calcium, l'iode, et les vitamines A et B2 pour la substitution du lait ou des desserts lactés.

Substituting meat or dairy products with plant-based substitutes has small and heterogeneous effects on diet quality and nutrient security – A simulation study in French adults (INCA3).

Marion Salomé,[1] Jean-François Huneau,[1] Capucine Le Baron,[1] Emmanuelle Kesse-Guyot,[2] Hélène Fouillet[1], François Mariotti[1]

[1] Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France; and [2] Sorbonne Paris Nord University, Inserm, Inrae, Cnam, Nutritional Epidemiology Research Team (EREN), Epidemiology and Statistics Research Center – University of Paris (CRESS), 93017 Bobigny, France

Sources of support: The authors report no funding was received for this study.

Author disclosures: MS's PhD fellowship is currently being funded in part by a research contract with Terres Univia, the French Interbranch organization for plant oils and proteins. FM is the scientific leader of this contract. The other authors report no conflicts of interest.

Corresponding Author: François Mariotti, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France
francois.mariotti@agroparistech.fr

4982 words for the entire manuscript (introduction through discussion)
4 Figures, 2 Tables
2 Supplementary Data (STROBE-NUT checklist, 1 supplemental method, 9 Supplemental Tables, 2 Supplemental Figures)
Running title: Plant-based substitutes and diet quality

Abbreviations used: ALA, alpha-linolenic acid; ANSES, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety; AS, Adequacy Subscore; CIQUAL, French Information Centre on Food Quality; DSCF, Dwass-Steel-Critchlow-Fligner test; INCA3, Third Individual and National Study on Food Consumption Survey; LA, linoleic acid; MS, Moderation Subscore; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; SFA; saturated fatty acids; UPF, ultra-processed foods.

Abstract

Background: Plant-based substitutes are designed to have the same use as animal-based foods in the diet and could therefore assist the transition towards more plant-based diets. However, their nutritional impact has not been characterized.

Objective: We assessed and compared the effects of plant-based substitutes on the nutritional quality of the diet.

Methods: We simulated separately the substitution of meat, milk and dairy desserts with 96 plant-based substitutes in the diets of 2121 adults (18-79y) from the cross-sectional French national survey INCA3 (2014-2015). The quality of initial individual diets and the 203,616 substituted diets was evaluated using the PANDiet scoring system which assesses the probability of adequate (sufficient and not excessive) nutrient intake, and the nutrient security was evaluated using the SecDiet scoring system that assesses the risk of overt deficiency.

Results: Impacts on PANDiet depended on both the food substituted and the types of substitutes. Soy-based substitutes provided a slight improvement in diet quality (0.8% increase of the PANDiet score when substituting meat), whereas cereal-based substitutes resulted in a 1.1% decrease. Globally, substitutions led to better adequacies for fiber, linoleic acid, alpha-linolenic acid, vitamin E, folate and saturated fatty acids, but lower adequacies regarding vitamin B-12 and riboflavin, as well as bioavailable zinc and iron when substituting meat, and calcium and iodine when substituting milk/dairy desserts. When they substituted dairy products, calcium-fortified substitutes allowed to maintain calcium adequacy but there was a higher risk of iodine deficiency when substituting dairy which may warrant iodine fortification. Substitutions modified the energy share of ultra-processed foods from 29% to 27-40%, depending on the food substituted and the substitute employed.

Conclusion: Plant-based substitutes had little effect on overall diet quality but heterogeneous impacts on nutrient adequacy and security. Plant-based substitutes that include legumes appear more nutritionally adequate to substitute animal products than other substitutes.

Key words: Plant-based substitutes, Diet quality, Nutrient adequacy, Animal product substitution, Modelled diet.

Introduction

Reducing the consumption of animal foods is a key element in achieving healthy and sustainable diets (1–3). Increasing numbers of consumers are now willing to reduce or stop the consumption of animal products for environmental, health or ethical reasons (4,5). As for dairy products, along with environmental or ethical issues consumers may avoid milk consumption because of milk allergy or lactose intolerance, which has led to growing demand for alternatives (6,7).

Plant-based substitutes have been developed in this context and constitute a continuously expanding market (8,9). These products aim to mimic the sensory attributes and practical use of animal products (10,11). Dairy substitutes are made by extracting plant materials with water and can be further fermented to produce plant-based yogurt-like products (12). Plant-based meat substitutes, also called meat analogues or imitation meat, are generally made using soy, wheat or other plant proteins (9,10).

The advantage of these products is that they can easily substitute meat without modifying meal patterns and food habits (13), unlike pulses that require more knowledge of how to cook and consume them (14). Indeed, animal products, and especially meat, play an important role in structuring meals (13,15) and plant-based substitutes that have the same use could offer an efficient lever for their replacement and the adoption of more sustainable diets (11). These products also have less environmental impact than meat or milk and other meat substitutes (e.g. lab-grown meat, insect-based substitutes, etc.) (12,16,17).

However, little is known about the nutritional quality of these products. Indeed, many of those available are made using different ingredients and processing technologies (9,18). Since these products are designed to be used as a substitution of animal products, and animal and plant products do not bring the same nutrients (19,20), their true nutritional substitutability needs to be investigated. Furthermore, even if plant-based diets are generally associated with beneficial health effects such as a lower risk of cardiovascular diseases (21,22), this is dependent on the types of plant-based foods being consumed (23,24). Plant-based substitutes are often ultra-processed (9,18) and the excessive consumption of ultra-processed foods has been associated with several adverse health effects (25–27).

Several studies have investigated the nutrient content of meat or milk substitutes (7,8,28) or the potential impacts of using meat substitutes when modelling healthy eating patterns (29). However, no study has assessed the expected nutritional impact of using plant substitutes, or analyzed the degree to which this may vary depending on the types of substitutes. The objective of this study was therefore to simulate, in a French adult population, the substitutions of meat, milk or dairy desserts separately with different types of plant-based substitutes in order to analyze the potential impacts of these substitutions on diet quality and nutrient security.

Subjects and methods

Population data

The data used in this study came from the third French Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (INCA3), which is a nationwide and representative cross-sectional survey. This study was performed in mainland France in 2014-2015 and its methods, design and participant characteristics have been fully described elsewhere (30,31). Participants over 18y were included in the study and the sample contained 2121 adults (887 men and 1234 women, aged 18-79y, median age 51y).

Dietary data

The foods and beverages consumed by individuals were obtained through three non-consecutive 24h-dietary recalls consisting of two weekdays and one weekend day spread over three weeks. Dietary data were collected by a telephone interview assisted by dietary software. The participants were not aware of the days of recall so they could not change their diet in anticipation of the call. Validated photographs were used to estimate portion sizes (30). The nutrient contents of different foods and beverages were extracted from the 2016 food composition database from the French Information Centre on Food Quality (CIQUAL) (32).

Food items were broken down into their ingredients in order to identify the origin (animal or plant) of each ingredient and determine the amounts of plant protein in each food item and then in the diet of each participant. The NOVA classification (33,34) was applied to all food items consumed in the INCA3 survey (Supplemental Method 1). This classification comprises four groups: “unprocessed/minimally processed foods”, “processed culinary ingredients”, “processed foods” and “ultra-processed foods” (UPF). When the food was home-made, eaten in a restaurant or made by an artisan, the NOVA classification was applied to the ingredients constituting the food item. In other cases, the NOVA classification was directly applied to the food items. Only UPF were considered in our study, and the proportion (%) of total energy intake from UPF was calculated for each participant.

Database on plant-based substitutes

The nutritional compositions of plant-based substitutes were gathered from three databases: CIQUAL food composition databases version 2016 (32) and version 2020 (35) and the food composition database from the NutriNet-Santé study (36). Three types of substitutes were used for this study: meat substitutes, milk substitutes and dairy dessert substitutes. Pulses were also included in the study as a benchmark for meat substitution. The final database contained 56 meat substitutes, 16 milk substitutes and 24 dairy dessert substitutes (Supplemental Table 1). The substitutes were classified in two different ways: according to the category (e.g. a plant-based burger, or a plain plant-based milk) and according to the main protein ingredient in the substitute (e.g. soy-based or cereal-based) (**Table 1**). Milk and dairy dessert substitutes were categorized as “sweet” if they contained at least 5g of sugars and as “calcium-fortified” if they contained at least 80mg calcium, or if the name explicitly specified “fortified with calcium”. This classification was inspired from the classification of dairy product proposed by the French Agency for Food, Environmental, and Occupational Health and Safety (ANSES) for the construction of food

consumption guidelines for the French population (37). In the same way as for the INCA3 survey, plant-based substitutes were broken down into ingredients to determine the percentage of plant protein (because some of them may contain cheese or egg). The NOVA classification was also applied to plant-based substitutes.

Table 1. Classification of meat, milk or dairy dessert substitutes according to the substitute category or the main constituting ingredient.

Type of substitute	Substitute category	Main constituting ingredient
Meat substitutes (n=56)	Cooked pulses (n=13) Tofu, tempeh or soy protein (n=3) Plant-based burgers (n=24) Plant-based sausages (n=5) Plant-based meat balls or slices (n=5) Plant-based breaded foods (n=6)	Pulse-based (n=18) Cereal-based (n=6) Soy & Wheat-based (n=11) Soy-based (n=21)
Milk substitutes (n=16)	Plain plant-based milks (n=7) Plain plant-based milks, calcium-fortified (n=3) Sweet plant-based milks (n=4) Sweet plant-based milks, calcium-fortified (n=2)	Soy-based (n=6) Cereal-based (n=3) Nut-based (n=7)
Dairy dessert substitutes (n=24)	Plain plant-based desserts (n=2) Plain plant-based desserts, calcium fortified (n=2) Sweet plant-based desserts (n=10) Sweet plant-based desserts, calcium fortified (n=8) Plant-based mousses (n=2)	Soy-based (n=19) Non soy-based (n=5)

Simulations of substitutions of meat or dairy with plant-based substitutes

Identification of substitutable food items

First, we identified all animal-based food items consumed by the INCA3 population that could be replaced by plant-based substitutes on the basis that food items and substitutes are generally consumed in the same way during a meal. In the case of meat, all pieces of meat usually consumed in a main dish were considered to be substitutable. Meat food items were divided into three categories (Beef/lamb/game, Poultry/rabbit and Pork/sausage). With respect to milk, all milk food items, except milk powder or condensed milk, were considered to be substitutable. For dairy desserts, all prepacked yogurts, custard desserts and other dairy desserts (e.g. rice pudding) were considered to be substitutable. Prepacked mousses were also included in dairy desserts. Animal-based ingredients in composite dishes (e.g. pizza, lasagna) were not considered to be substitutable.

Method of substitution

For each individual, we simulated the substitution of substitutable animal-based food items, as defined above, with the same quantity, in grams, of a plant-based substitute, under the rationale that the portion sizes of animal foods and their plant-based substitutes are generally the same (e.g. a glass of milk or of milk substitute will have the same portion size). Then, at the individual level, the difference in energy value between the animal-based food items and the plant-based substitute was reported equally on all other food items consumed (excluding beverages) in order to maintain the same total energy intake without alcohol.

We used three separate substitution models (Supplemental Figure 1). The first was the “Meat substitution model” where all meat food items were substituted. This model was further broken down into three sub-models: “Beef substitution model” where all beef, veal, lamb, horse and game meats were substituted; “Pork substitution model” where all pork meats and sausages were substituted and the “Poultry substitution model” where all poultry and rabbit meats were substituted. The second model was the “Milk substitution model” where all milk items were substituted. The third model was the “Dairy dessert substitution model” where all prepacked dairy dessert (including yogurts) items were substituted. For all models, animal-based food items other than those concerned were not replaced (e.g. in the case of the “Meat substitution model”, milk or dairy desserts were not replaced).

For every model, all substitutable food items were replaced by the same plant-based substitute and we implemented as many substitutions as we had plant-based substitutes available. For example, in the “Meat substitution model”, the first substitution involved all meat items being replaced by the “Falafel” substitute, while under the second substitution they were replaced by the “Plant-based sausage with wheat or seitan” substitute, until all substitutes had been tested. Fifty-six substitutes were available for the “Meat substitution model”, so we implemented 56 different replacements. In the same way, 16 replacements were made under the “Milk substitution model” and 24 under the “Dairy dessert substitution model”. All individual diets were then evaluated for their nutritional quality. The simulation yielded a total of 2121x96=203,616 simulated diets.

Evaluation of the nutritional quality of the diet

Diet quality was evaluated using an updated version of the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) scoring system (38) that took account of the most recent dietary reference intakes released by ANSES (39) (Supplemental Table 2). The PANDiet was preferred over other assessments of adequacy of nutrients intakes since it enables to use an overall index for the population that could better capture the evolution of diet quality between initial and substituted diets. In brief, the PANDiet score measures the probability of having an adequate overall nutrient intake at an individual level. It is the mean of two sub-scores: The Adequacy Sub-score (AS) and the Moderation Sub-score (MS). The AS measures the probabilities of adequacy of intake for 27 nutrients whose intake needs to be above the nutrient reference value, and is the mean of all probabilities of adequacy multiplied by 100. The MS measures the probabilities of adequacy of not having an excessive intake for 6 nutrients whose intake should be below an upper bound reference value, and is the mean of all probabilities of adequacy multiplied by 100. For each nutrient, the probability of adequacy is calculated using the mean intake, the intra-individual variability of intake, the variability of the requirement and the nutrient reference value. AS, MS and PANDiet values range from 0 to 100 and higher scores indicate better nutrient adequacy, better moderation of the diet and better nutritional quality of the diet, respectively.

Evaluation of the nutrient security of the diet

Nutrient security of the diet was estimated using the SecDiet score which measures the risk of having an overt nutrient deficiency (40). It is calculated as the mean of the squares of the probabilities for 12 nutrients of having a sufficient intake to avoid nutrient deficiency. The nutrients included in the SecDiet are vitamin A, thiamin, riboflavin, niacin, folate, vitamin B-12, vitamin C, iodine, selenium, iron, zinc and calcium. A deficiency threshold has been defined for each nutrient

as the minimal intake below which clinical signs of deficiency may appear (Supplemental Table 3). These thresholds are generally much lower than classical dietary reference intakes, since dietary reference intakes generally go beyond the mere prevention of overt deficiency. Therefore, the SecDiet does not measure classical adequacy of nutrient intakes but the risk of deficiency that could arise if nutrient intakes are below deficiency thresholds. In the same way as for the PANDiet, the probability of having a sufficient intake for each nutrient is calculated from the mean intake, intra-individual variability of intake, variability of the requirement and the nutrient reference value (here defined using the threshold value). SecDiet values range from 0 to 1 and a higher score reflects a lower risk of nutrient deficiency.

Statistical analysis

For the initial diet and each substitution in each model, the PANDiet and SecDiet scores and associated probabilities, and the proportions of plant protein intake and total energy intake from UPF were calculated. The three substitution models were analyzed separately. For each model, only participants who had consumed at least one substitutable food item were included in the analyses (n=1949 for the "Meat substitution model", n=837 for the "Milk substitution model" and n=1666 for the "Dairy dessert substitution model"). Mean substitutions were calculated by averaging for each individual the results of replacements using substitutes from the same substitute category or from the same main constituting ingredient. Differences between the initial diet and mean substitutions diet were then assessed using ANOVA. Post-hoc tests were performed using a Bonferroni correction for multiple comparisons. For the SecDiet score and associated probabilities, because of their particular skewed distributions, Kruskal-Wallis non-parametric and post-hoc Dwass-Steel-Critchlow-Fligner (DSCF) tests were run. Means are presented as means ± SD and differences between means are presented with a 95% CI.

All statistical analyses were performed using SAS version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.). Significance was set at $P<0.05$.

Results

Substitution of meat food items with plant-based meat substitutes ("Meat substitution model")

When replacing meat food items with plant-based meat substitutes (n=1949 consumers), the mean PANDiet score ranged from 67.1 to 70.4 (vs 68.3 for the initial diet) across the different substitution diets (i.e. across the different plant-based substitutes used). In particular, the AS ranged from 59.6 to 66.0 (vs 63.7) and the MS from 72.0 to 76.9 (vs 73.0). The SecDiet score ranged from 0.89 to 0.94 (vs 0.92). On average over all the substitutes used, diet quality and nutrient security were therefore only marginally affected by the substitution. By contrast, the percentage of plant protein increased (ranging from 45.2% to 61.5% vs 31.7% in the initial diet), as did the percentage of energy intake from UPF (except with cooked pulses, tofu and tempeh) which ranged from 27.2% to 39.5% (vs 28.6% in the initial diet) (**Table 2**).

Table 2. PANDiet, AS, MS and SecDiet scores, percentages of plant protein and total energy from UPF in the initial diet and substitution diets under the three substitution models (Meat, Milk and Dairy dessert) in the French adult population[1].

	PANDiet score	Adequacy Sub-score	Moderation Sub-score	SecDiet score	Plant protein (% of total protein)	UPF (% of total energy intake)
Meat substitution model (n=1949 consumers)						
Initial diet[2]	68.3 ± 6.2	63.7 ± 13.8	73.0 ± 11.9	0.92 ± 0.09	31.7 ± 9.2	28.6 ± 15.3
Substitution diets[3] (n=56 diets)	68.6 [67.1-70.4]	63.2 [59.6-66.0]	74.0 [72.0-76.9]	0.92 [0.89-0.94]	53.1 [45.2-61.5]	33.9 [27.2-39.5]
Milk substitution model (n=837 consumers)						
Initial diet	69.0 ± 6.1	64.8 ± 13.5	73.3 ± 11.8	0.93 ± 0.09	31.4 ± 9.1	29.6 ± 15.6
Substitution diets (n=16 diets)	68.4 [66.7-70.0]	64.0 [62.2-67.4]	72.8 [71.1-73.4]	0.92 [0.91-0.93]	36.2 [34.1-38.9]	33.2 [31.6-34.8]
Dairy dessert substitution model (n=1666 consumers)						
Initial diet	68.5 ± 6.1	64.3 ± 13.5	72.7 ± 11.8	0.93 ± 0.09	32.1 ± 9.4	29.3 ± 15.2
Substitution diets (n=24 diets)	68.6 [65.2-70.0]	64.3 [61.3-66.4]	72.9 [69.2-74.3]	0.92 [0.89-0.93]	37.7 [34.5-42.3]	31.8 [28.9-40.5]

[1]Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, n=2121. AS, Adequacy sub-score; MS, Moderation sub-score; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; UPF, Ultra-processed foods.
[2] Values are mean ± SD.
[3] Values are mean [min, max]. Means are obtained by averaging the means of all the substitution diets of a substitution model (Meat, Milk or Dairy dessert). Min and max are respectively the lowest and the highest means between all the substitution diets of a substitution model.

More specifically regarding the substitutes used, the PANDiet score was increased after substitutions using “Tofu, tempeh or soy protein” (+1.58 points) or “Soy-based” (+0.57 points) substitutes and decreased with “Plant-based sausage” (-0.60 points) or “Cereal-based” (-0.72 points) substitutes (all *P*s<0.0001). In particular, the AS score remained stable or decreased (the most important decrease concerning substitution with “Cereal-based” substitutes (-3.08 points, *P*<0.0001)) while the MS remained stable or increased (the greatest increase concerning “Plant-based beaded food” substitutes (+2.51 points, *P*<0.0001)) (**Figure 1**, Supplemental Tables 4 and 5).

At a more detailed level, the probabilities of adequacy of the AS score (i) increased (i.e. better nutrient adequacy) in most mean substitution diets for fiber, linoleic acid (LA), α-linolenic acid (ALA), folate, calcium, and vitamin E and to a lesser extent for manganese, magnesium and copper, and (ii) decreased (i.e. less nutrient adequacy) for vitamin B-12, bioavailable zinc, vitamin B-6, bioavailable iron, riboflavin and protein and to a lesser extent for pantothenic acid. The probabilities of adequacy of the MS score (i) increased (i.e. less excessive intake) for saturated fatty acids (SFA) and to a lesser extent for total fat and protein, and (ii) decreased (i.e. more excessive intake) for sodium and to a lesser extent for carbohydrates (Supplemental Tables 4 and 5).

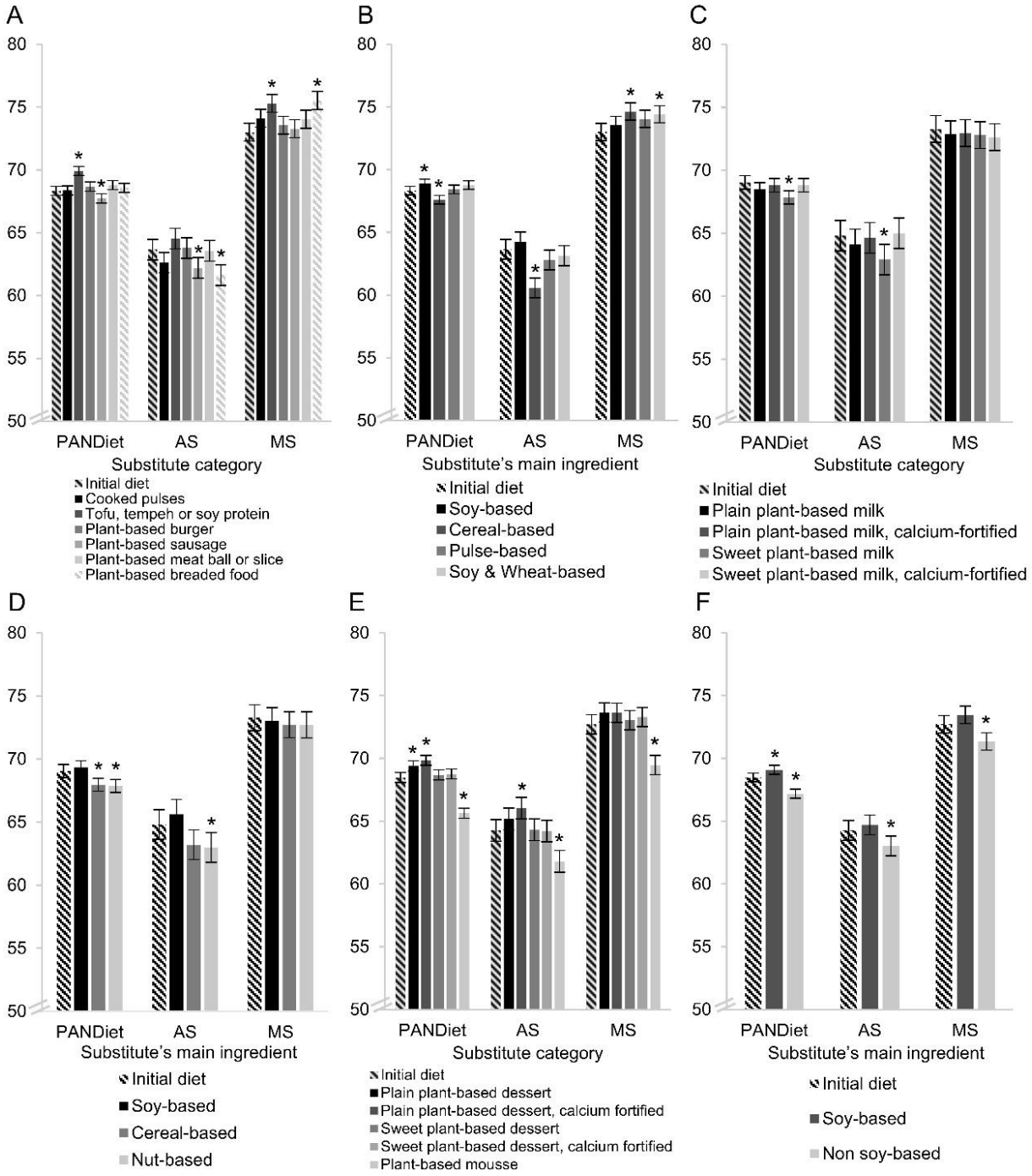


Figure 1. PANDiet score, Adequacy Sub-score (AS) and Moderation Sub-score (MS) for the initial diet and substitution diets according to the substitute category or to the main constituting ingredient of the substitute, for the three substitution models. (A, B) "Meat substitution model" (n=1949) simulated diets gathered by substitute categories (A) or by the main constituting ingredient of substitutes (B); (C, D) "Milk substitution model" (n=837) simulated diets gathered by substitute categories (C) or by the main constituting ingredient of substitutes (D); (E, F) "Dairy dessert substitution model" (n=1666) simulated diets gathered by substitute categories (E) or the

main constituting ingredient of substitutes (F). Values are means with 95% confidence intervals of the mean. * Significantly different from the initial diet, assessed using ANOVA and post-hoc tests with Bonferroni correction, at P<0.05. AS, Adequacy sub-score; MS, Moderation subscore; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake.

The SecDiet score decreased after substitution with “Plant-based breaded food” (-0.01 points, *P*=0.0011) and “Cereal-based” (-0.02 points, *P*<0.0001) substitutes **(Figure 2)**. Probabilities decreases (i.e. an elevated risk of deficiency) were the most important for riboflavin (max. -0.05 points, *P*<0.0001), vitamin B-12 (max. -0.05 points, *P*<0.0001) and bioavailable iron (max. -0.03 points, *P*<0.0001), whereas probabilities increased (i.e. less risk of deficiency) for folate (max. +0.04 points, *P*<0.0001) and calcium (max. +0.03 points, *P*<0.0001).

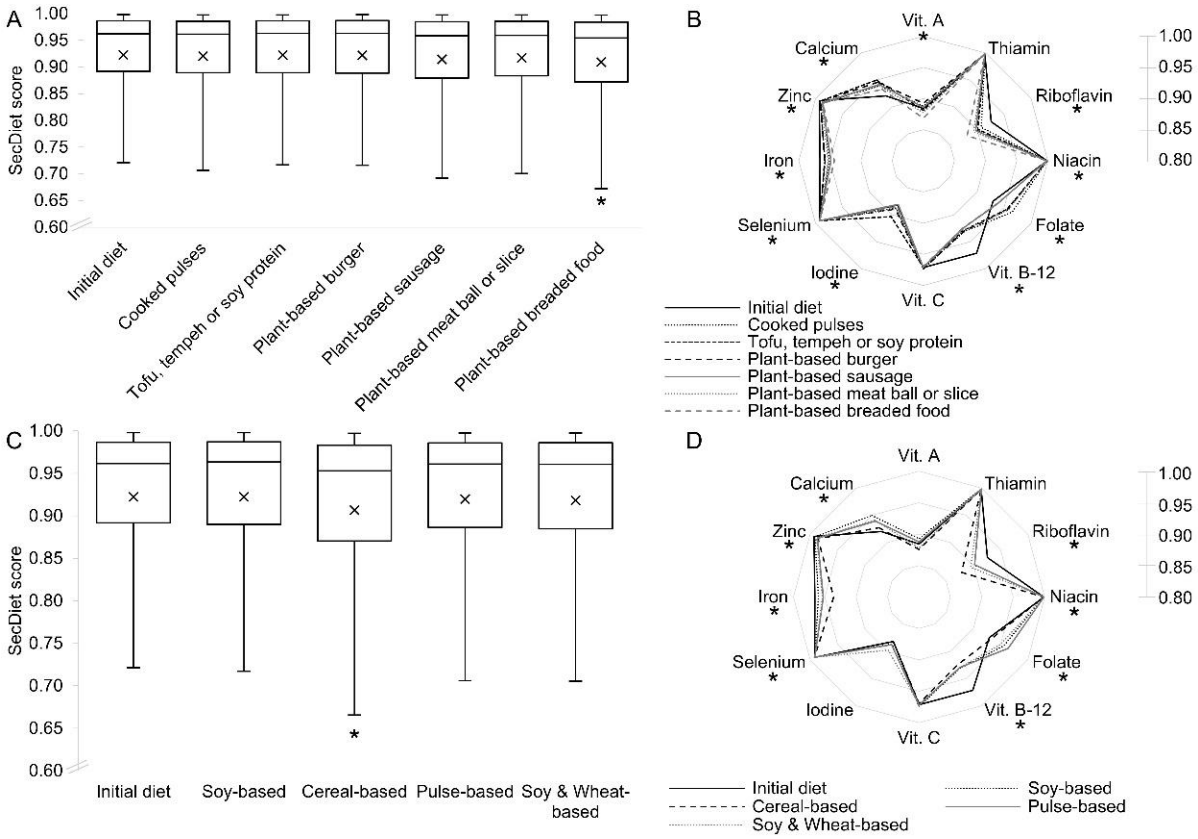


Figure 2. SecDiet score and probabilities for nutrients included in the SecDiet of avoiding overt nutrient deficiency in the initial diet and substitution diets of the “Meat substitution model” (n=1949). (A) SecDiet score and (B) its constituent probabilities in simulated diets gathered by substitute categories. (C) SecDiet score and (D) its constituent probabilities in simulated diets gathered by the main constituting ingredient of substitutes. (A, C) Lower and upper whiskers are respectively 5th and 95th percentiles; * Significantly different from the initial diet, assessed by Kruskal-Wallis and DSCF tests. (B, D) Values are means, error bars are not presented for the sake of clarity; * *P*(model)<0.05 for the nutrient probability, assessed by Kruskal-Wallis tests.

In sub-models of substitution, beef/lamb/game, poultry/rabbit and pork/sausage were separately substituted (Supplemental Figure 2). The variations observed in PANDiet, AS and MS scores regarding the substitutions of beef/lamb/game were comparable to those of all meat food items. For the substitution of pork/sausage, the PANDiet and MS scores of substitution diets mainly increased when compared to the initial diet. Regarding the substitution of poultry/rabbit, the variations were not significant, except in the case of substitution with “Tofu, tempeh or soy protein” substitutes that increased the PANDiet score.

Substitution of milk items with plant-based milk substitutes (“Milk substitution model”)

When replacing milk items with plant-based milk substitutes (n=837 consumers), the PANDiet score across the different substitution diets ranged from 66.7 to 70.0 (vs 69.0 for the initial diet). The AS ranged from 62.2 to 67.4 (vs 64.8) and the MS from 71.1 to 73.4 (vs 73.3). The SecDiet score mainly decreased (0.91-0.93 vs 0.93 for the initial diet). The percentage of plant protein in the diet increased systematically (34.1% - 38.9% vs 31.4% in the initial diet) as the percentage of energy intake from UPF (31.6% - 34.8% vs 29.6%) (Table 2).

More specifically, after substitution, the PANDiet and AS scores mostly decreased with “Sweet plant-based milk” (–1.19 points for PANDiet, P=0.0005, and -1.89 points for AS, P=0.0133) and “Nut-based” (-1.19 points for PANDiet, P<0.0001, and -1.81 for AS, P=0.0001) substitutes, while the MS did not significantly vary (Figure 1). In more detail, for most mean substitution diets, the probabilities of adequacy of the AS score increased for LA, ALA, fiber, bioavailable iron, and slightly for manganese, vitamin E and copper, whereas probabilities decreased for calcium, vitamin B-12, riboflavin, iodine, potassium, and slightly for pantothenic acid and protein. For calcium, the decrease was only significant with unfortified plant-based milk substitutes. The probabilities of adequacy of the MS score increased for SFA but decreased for sugars without lactose (Supplemental Tables 6 and 7).

The SecDiet score systematically decreased after substitution, and the most marked decreases were obtained with “Nut-based” and “Sweet plant-based milk” substitutes (both -0.02 points, Ps<0.0001) **(Figure 3)**. The decreases in probabilities were the most marked for iodine (max. -0.06 points, P<0.0001), riboflavin (max. -0.05 points, P<0.0001), calcium (max. -0.04 points, P<0.0001) and vitamin A (max. -0.03 points, P<0.0001). The calcium probability did not decrease with “Plain plant-based milk, calcium-fortified” and “Sweet plant-based milk, calcium-fortified” substitutes.

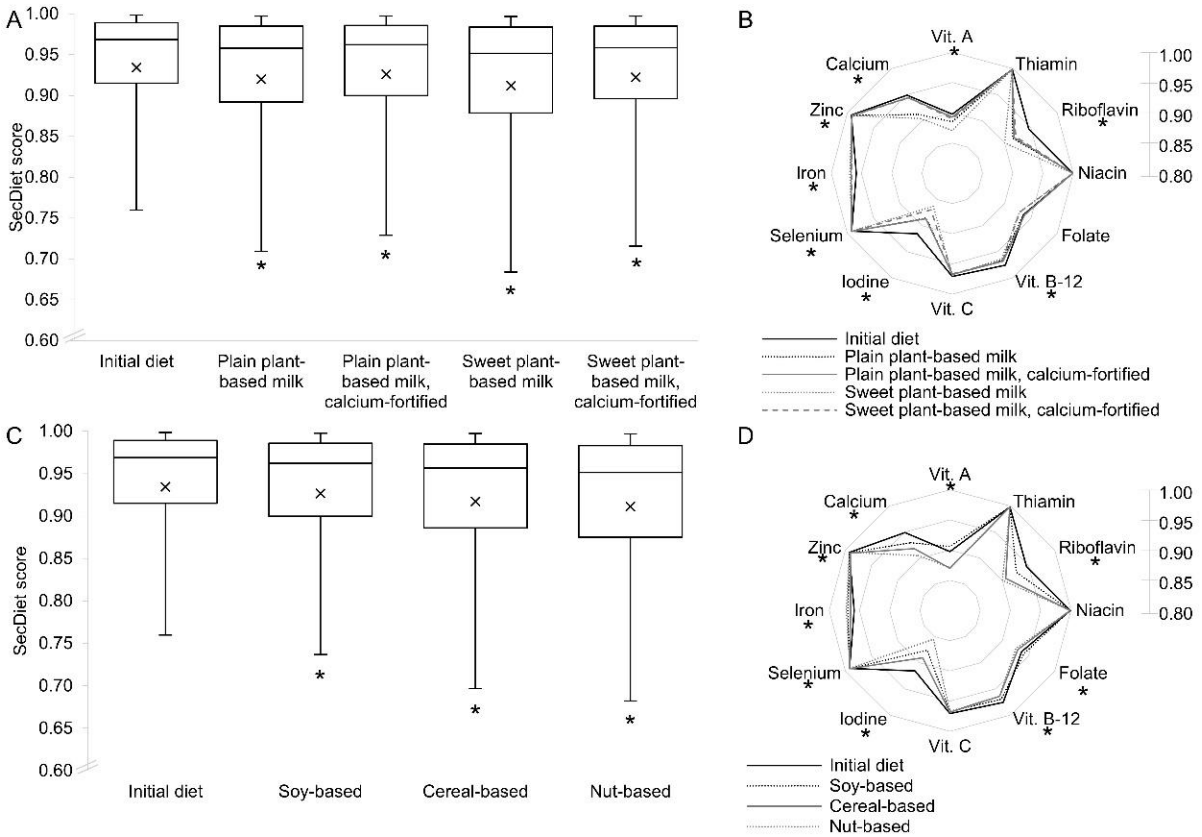


Figure 3. SecDiet score and probabilities for nutrients included in the SecDiet of avoiding overt nutrient deficiency in the initial diets and substitution diets of the "Milk substitution model" (n=837). (A) SecDiet score and (B) its constituent probabilities in simulated diets gathered by substitute categories. (C) SecDiet score and (D) its constituent probabilities in simulated diets gathered by the main constituting ingredient of substitutes. (A, C) Lower and upper whiskers are respectively 5th and 95th percentiles; * Significantly different from the initial diet, assessed by Kruskal-Wallis and DSCF tests. (B, D) Values are means, error bars are not presented for the sake of clarity; * *P*(model)<0.05 for the nutrient probability, assessed by Kruskal-Wallis tests.

Substitution of dairy dessert items with plant-based dairy dessert substitutes ("Dairy dessert substitution model")

When replacing dairy dessert items with plant-based dairy dessert substitutes (n=1666 consumers), the PANDiet scores across the different substitution diets ranged from 65.2 to 70.0 (vs 68.5 for the initial diet). The AS ranged from 61.3 to 66.4 (vs 64.3 for the initial diet) and the MS from 69.2 to 74.3 (vs 72.7). The SecDiet ranged from 0.89 to 0.93 (vs 0.93 for the initial diet). The percentage of plant protein in the diet (initially 32.1%) increased between 34.5% and 42.3%. The percentage of energy intake from UPF (initially 29.3%) generally increased, to reach between 28.9% and 40.5% (Table 2).

More specifically, the PANDiet score increased with "Plain plant-based dessert, calcium-fortified" (+1.35 points), "Plain plant-based dessert" (+0.93 points) and "Soy-based" (+0.60 points)

substitutes and decreased with “Plant-based mousse” (-2.85 points) and “Non-soy based” (-1.31 points) substitutes (all *P*s<0.0001). The AS increased with “Plain plant-based dessert, calcium-fortified” substitutes (+1.77 points, *P*<0.0001) and both the AS and the MS decreased with “Plant-based mousse” (-2.46 points for AS, *P*<0.0001, -3.24 points for MS, *P*<0.0001) and “Non soy-based” (-1.25 points for AS, *P*=0.0008, -1.36 points for MS, *P*<0.0001) substitutes (Figure 1).

In more detail, the probabilities of adequacy of the AS score increased for LA, fiber, ALA and bioavailable iron, and to a lesser extent for vitamin E, copper, manganese and magnesium, while they decreased for calcium, riboflavin and iodine and to a lesser extent for pantothenic acid. The probability of calcium adequacy did not decrease with calcium-fortified substitutes. The probabilities of adequacy of the MS score increased for SFA, except for “Plant-based mousse” where it decreased (Supplemental Tables 8 and 9).

The SecDiet score significantly decreased after all substitutions, except with calcium-fortified plain plant-based desserts. The lowest scores were obtained for “Plant-based mousse” (-0.03 points, *P*<0.0001) and “Non soy-based” (-0.02 points, *P*<0.0001) substitutes **(Figure 4)**. The most important reductions in probabilities were observed for iodine (max. -0.09 points, *P*<0.0001), calcium (max. -0.08 points, *P*<0.0001) and riboflavin (max. -0.07 points, *P*<0.0001).

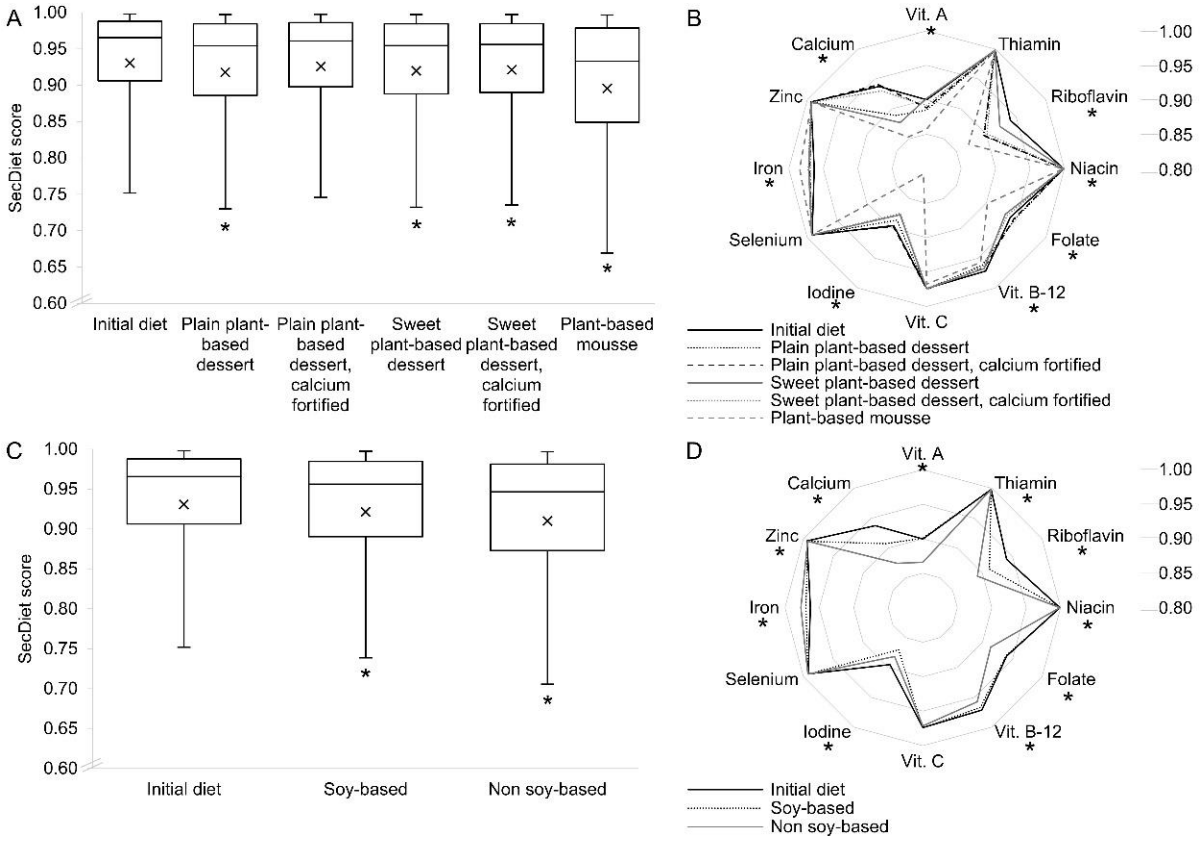


Figure 4. SecDiet score and probabilities for nutrients included in the SecDiet of avoiding overt nutrient deficiency in the initial diets and substitution diets of the “Dairy dessert substitution model” (n=1666). (A) SecDiet score and (B) its constituent probabilities in simulated diets gathered by substitute categories. (C) SecDiet score and (D) its constituent probabilities in simulated diets gathered by the main constituting ingredient of substitutes. (A, C) Lower and upper whiskers are

respectively 5th and 95th percentiles; * Significantly different from the initial diet, assessed by Kruskal-Wallis and DSCF tests. (B, D) Values are means, error bars are not presented for the sake of clarity; * *P*(model)<0.05 for the nutrient probability, assessed by Kruskal-Wallis tests.

Discussion

In this study, we modeled the substitution of animal foods with plant-based substitutes and evaluated its effects on diet quality and the risk of deficiency, using in depth assessments based on nutrient intakes. The issue of the nutritional quality of plant-based substitutes is usually addressed by comparing the nutrient contents of food products, often with information on a reduced set of nutrients and not taking account of the frequency and amounts consumed or the importance of nutrients to public health. By contrast, our study offers an integrated quantitative assessment of the true expected impact of such changes at the level of whole diets.

The main finding of our study was that the nutritional impact of substitution depended on both the food products replaced and the types of plant-based substitutes employed. Nonetheless, there were some common trends for certain nutrients across the different substitution models.

Impacts of substitutions on nutrients that need to be limited

First, we found that the substitution of animal products led to an increase in the probabilities of adequacies of the MS, meaning a less excessive intake of nutrients that should be consumed in limited amounts. The same effect was observed in a previous study where the favorable evolution of the MS was mostly ascribed to the reduction in the consumption of animal products rather than the increase in the consumption of plant-based products (41). This increase was mainly observed for SFA, and consequently for total fat, and was further illustrated by the substitution of different meat types, where the MS score increased when replacing pork/sausage and beef/lamb/game but not poultry/rabbit meat, which is mostly lean. However, the consumer samples were different, thus limiting the comparison between meat types.

By contrast, we found decreases in the probabilities of adequate sodium intake in the meat substitution model, except when substitutions were made using “Cooked pulses” or “Tofu, tempeh or soy protein”. Sodium intake was increased from initially 3200mg/day to 3400mg/day on average. Sodium intake is already much exceeding recommendations and reduction of intake is advised to reduce the risk of chronic diseases (42). This increase could be explained by the fact that plant-based meat substitutes are often seasoned with salt in order to improve taste or preservation, as it is often the case for ultra-processed foods (18,33). In the case of dairy products, probability of adequate intake of sugars without lactose decreased for sweet substitutes. These results might be mitigated because these substitution scenarios did not take account of the fact that consumers might adjust the seasoning (i.e. salt or sauces for meat products and sugary products for dairy desserts) depending on the product they were consuming.

Impact of substitutions on nutrient adequacy and security

Another important finding of this study was that the modeled substitutions had a limited overall effect on nutrient adequacy, but the profile of nutrient adequacy was changed because animal-

based and plant-based products do not make the same contribution to nutrient intakes (19,43). For all modelled substitutions (meat, milk or dairy desserts), probabilities of adequacy increased for fiber, LA, ALA, vitamin E (and folate for meat substitution) and, to a lesser extent, for copper, manganese and magnesium. Higher consumption of fiber, ALA and LA is expected to have important health benefits (44–46) and plant-based products could contribute to increase the low intakes currently observed in the population. At the same time, we found decreases in the probabilities of adequacy for riboflavin, pantothenic acid, vitamin B-12 and protein and a small increase in the risk of clinical deficiency for riboflavin and vitamin B-12. Indeed, all these nutrients are largely provided by meat and dairy products (19,20). After meat substitution, probabilities of adequacy decreased for bioavailable iron and zinc, whereas the probability of adequacy for bioavailable iron slightly increased with the substitution of dairy foods.

For the substitution of milk or dairy desserts, the probability of adequacy for calcium decreased, and the risk of deficiency increased when using non-calcium-fortified substitutes. Therefore, to maintain a similar calcium intake, fortifying substitutes with calcium would appear to be an appropriate security measure. Dairy substitution also resulted in a reduction in probabilities (both adequacy and risk of deficiency) for iodine. Whereas dairy products are an important source of iodine in several countries because of dairy farming practices (47,48), the iodine content of plant-based milk alternatives is much lower than that of cow's milk (47,49). Current iodine status is suboptimal (50) and given the importance of iodine, especially in sub-populations such as pregnant women, fortifying plant-based dairy products with iodine could offer an interesting lever. Of course this question should be considered taking into account current public health strategies regarding iodine fortification (51).

Impact of substitutions depending on the type of substitutes

Finally, we could draw comparisons between different types of plant-based substitutes. For all modelled substitutions, it appeared that soy-based substitutes led to a slight improvement in diet quality. Soy is generally preferred for plant-based substitutes because of its textural properties and high protein content (9). Soy-based substitutes may also have a more favorable nutrient content, as reported in a US study according to which soy-based substitutes contained more fiber, omega-3-fatty acids, iron, zinc, thiamine, riboflavin, vitamin B6 and folates than other substitutes (28). In contrast, we found that cereal-based substitutes decreased nutrient adequacy and security. Since cereals are currently the main contributors of plan protein in western diets (52), diversifying plant-protein sources is indeed preferable for nutrient adequacy when replacing animal with plant protein (41).

As for milk substitutes, it has been shown that soy and almond milks have a better nutrient composition than coconut milk (which is rich in saturated fat) and rice milk (which is often high in sugars) (7). This would explain why we found that nutrient adequacy was globally maintained with soy-based substitutes and slightly decreased with cereal and nut-based substitutes. As already mentioned, we also found differences between plain vs. sweet and calcium-fortified vs. unfortified drinks. From our results, plain soy-based calcium-fortified substitutes appeared to be best substitutes for milk, and the same conclusion can be drawn for plant-based desserts. The case of plant-based mousses was quite particular because they were rich in energy (269kcal/100g on average vs 86kcal/100g on average for other substitutes), and since the substitutions were

isocaloric, this led to an important adjustment over the consumption of the rest of the diet which finally resulted in unbalancing the diets.

One final aspect that needs to be highlighted regarding plant-based substitutes, and in particular meat substitutes, is that they may contain many ingredients and be heavily processed to mimic meat as best as possible (9). We found that replacing meat with plant-based substitutes would increase the percentage of energy intake from UPF. Therefore, minimally-processed substitutes (such as tofu, tempeh or pulses) might be preferred to limit UPF consumption, all the more that they had similar, an even more beneficial, impacts on diet quality than ultra-processed substitutes. However, another study found that people following vegetarian diets consumed more UPF, partly due to the consumption of plant-based substitutes, and that an increased consumption of UPF was associated with the recent introduction of a vegetarian diet (53). Indeed, these products might be easier to consume when individuals start to reduce their meat consumption.

Limitations of the study

Although this study used quite a large set of 96 substitutes (including pulses) whose full and detailed nutrient composition was available, we may not have described exhaustively the plant-based substitutes market which is very recent and dynamic. Nevertheless, this sample was diversified and contained the principal types of substitutes. Consumer preferences and behavior were not taken into account in this study, and all the products within a category were replaced, regardless of the rest of the diet. We substituted all items from the same category with the same substitute without matching food items with the closest plant-based substitute in term of appearance, because this was needed to compare plant-based substitutes between them. The changes thus simulated could therefore be considered as not being entirely realistic, but we believe that this was an effective method to study the nutritional quality of plant-based substitutes insofar as the nutritional quality of a food product is better evaluated by considering its impact when integrated in the whole diet. This also enabled us to highlight nutrients of concern with respect to the current consumption of a population. Lastly, by comparing each individual with themselves after simulated changes in the diet of individuals, modeling studies offer comparisons that are free of confounding factors such as the sociodemographic characteristics of individuals. It should be noted that this exploratory study ran many comparisons across variables and factors that could have much inflated type I error, but we limited this trend using Bonferroni corrections. Finally, since we wanted to analyze the variability of the impacts of substituting meat, milk or dairy desserts separately according to substitute, we did not estimate the impact of substituting these three categories at the same time.

Conclusion

In the present study, we analyzed the impacts on diet quality and nutrient security of substituting meat, milk and dairy desserts with corresponding plant-based substitutes in a French adult population. Substitutions improved the moderation score but had mixed effects on adequacy since the nutrient adequacy profile was modified. Impacts on nutrient security remained limited but attention should be given to certain nutrients, namely iodine and calcium when replacing milk and dairy desserts, and bioavailable iron and vitamin B-12 when replacing meat. Adjustments of the rest of the diet or improving the composition of substitutes could help solve these issues (29,54), and would requires further investigation.

Overall, the impact of plant-based substitutes on diet quality was small but varied: the nutritional impact of some substitutes proved to be positive, such as those that include legumes, but others proved to be negative, such as plant-based mousse as a replacement for dairy desserts. If seeking to limit the share of ultra-processed foods in the diet, pulses, tofu or tempeh offer a good alternative to other substitutes.

Acknowledgments and statement of authors' contributions to manuscript

The authors would like to thank the Nutritional Epidemiology Research Team (EREN) at Université Paris 13, France for providing the nutritional compositions of plant-based substitutes extracted from the food composition table of the NutriNet-Santé Study.

MS, FM and J-FH: designed the research; MS and CL: conducted the research and performed statistical analysis; MS and FM: analyzed the results; J-FH, EK-G and HF provided methodological support; MS and FM: wrote the manuscript; all authors provided critical comments on the manuscript; MS and FM: had primary responsibility for the final content and all authors read and approved the final manuscript.

References

1. Springmann M, Clark M, Mason-D'Croz D, Wiebe K, Bodirsky BL, Lassaletta L, de Vries W, Vermeulen SJ, Herrero M, Carlson KM, et al. Options for keeping the food system within environmental limits. Nature. 2018;562:519–25.

2. McMichael AJ, Powles JW, Butler CD, Uauy R. Food, livestock production, energy, climate change, and health. Lancet. 2007;370:1253–63.

3. Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F, Wood A, et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Lancet. 2019;393:447–92.

4. Radnitz C, Beezhold B, DiMatteo J. Investigation of lifestyle choices of individuals following a vegan diet for health and ethical reasons. Appetite. 2015;90:31–6.

5. Miki AJ, Livingston KA, Karlsen MC, Folta SC, McKeown NM. Using Evidence Mapping to Examine Motivations for Following Plant-Based Diets. Curr Dev Nutr. 2020;4:nzaa013.

6. Sethi S, Tyagi SK, Anurag RK. Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: a review. J Food Sci Technol. 2016;53:3408–23.

7. Vanga SK, Raghavan V. How well do plant based alternatives fare nutritionally compared to cow's milk? J Food Sci Technol. 2018;55:10–20.

8. Curtain F, Grafenauer S. Plant-Based Meat Substitutes in the Flexitarian Age: An Audit of Products on Supermarket Shelves. Nutrients. 2019;11:2603.

9. Boukid F. Plant-based meat analogues: from niche to mainstream. Eur Food Res Technol. 2020;1–12.

10. Kumar P, Chatli MK, Mehta N, Singh P, Malav OP, Verma AK. Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. Crit Rev Food Sci Nutr. 2017;57:923–32.

11. Jiang G, Ameer K, Kim H, Lee E-J, Ramachandraiah K, Hong G-P. Strategies for Sustainable Substitution of Livestock Meat. Foods. 2020;9:1227.

12. Mäkinen OE, Wanhalinna V, Zannini E, Arendt EK. Foods for Special Dietary Needs: Non-dairy Plant-based Milk Substitutes and Fermented Dairy-type Products. Crit Rev Food Sci Nutr. 2016;56:339–49.

13. Schösler H, Boer J de, Boersema JJ. Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution. Appetite. 2012;58:39–47.

14. Figueira N, Curtain F, Beck E, Grafenauer S. Consumer Understanding and Culinary Use of Legumes in Australia. Nutrients. 2019;11:1575.

15. Apostolidis C, McLeay F. Should we stop meating like this? Reducing meat consumption through substitution. Food Policy. 2016;65:74–89.

16. Smetana S, Mathys A, Knoch A, Heinz V. Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. Int J Life Cycle Assess. 2015;20:1254–67.

17. Nijdam D. The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. Food Policy. 2012;37:760–70.

18. Bohrer BM. An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products. Food Sci Hum Wellness. 2019;8:320–9.

19. Phillips SM, Fulgoni VL, Heaney RP, Nicklas TA, Slavin JL, Weaver CM. Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. Am J Clin Nutr. 2015;101:1346S-1352S.

20. Cocking C, Walton J, Kehoe L, Cashman KD, Flynn A. The role of meat in the European diet: current state of knowledge on dietary recommendations, intakes and contribution to energy and nutrient intakes and status. Nutr Res Rev. 2020;33:1–9.

21. Kim H, Caulfield LE, Garcia-Larsen V, Steffen LM, Coresh J, Rebholz CM. Plant-Based Diets Are Associated With a Lower Risk of Incident Cardiovascular Disease, Cardiovascular Disease Mortality, and All-Cause Mortality in a General Population of Middle-Aged Adults. JAHA. 2019;8:e012865.

22. Mariotti F. Animal and Plant Protein Sources and Cardiometabolic Health. Adv Nutr. 2019;10:S351–66.

23. Satija A, Bhupathiraju SN, Rimm EB, Spiegelman D, Chiuve SE, Borgi L, Willett WC, Manson JE, Sun Q, Hu FB. Plant-Based Dietary Patterns and Incidence of Type 2 Diabetes in US Men and Women: Results from Three Prospective Cohort Studies. Moore SC, editor. PLoS Med. 2016;13:e1002039.

24. Satija A, Bhupathiraju SN, Spiegelman D, Chiuve SE, Manson JE, Willett W, Rexrode KM, Rimm EB, Hu FB. Healthful and Unhealthful Plant-Based Diets and the Risk of Coronary Heart Disease in U.S. Adults. J Am Coll Cardiol. 2017;70:411–22.

25. Monteiro CA, Cannon G, Lawrence M, Costa Louzada ML, Pereira Machado P. Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system. Rome: FAO; 2019.

26. Martínez Steele E, Juul F, Neri D, Rauber F, Monteiro CA. Dietary share of ultra-processed foods and metabolic syndrome in the US adult population. Prev Med. 2019;125:40–8.

27. Rauber F, Chang K, Vamos EP, da Costa Louzada ML, Monteiro CA, Millett C, Levy RB. Ultra-processed food consumption and risk of obesity: a prospective cohort study of UK Biobank. Eur J Nutr. 2020;1–12.

28. Fresán U, Mejia MA, Craig WJ, Jaceldo-Siegl K, Sabaté J. Meat Analogs from Different Protein Sources: A Comparison of Their Sustainability and Nutritional Content. Sustainability. 2019;11:3231.

29. Mertens E, Biesbroek S, Dofková M, Mistura L, D'Addezio L, Turrini A, Dubuisson C, Havard S, Trolle E, Geleijnse JM, et al. Potential Impact of Meat Replacers on Nutrient Quality and Greenhouse Gas Emissions of Diets in Four European Countries. Sustainability. 2020;12:6838.

30. Dubuisson C, Dufour A, Carrillo S, Drouillet-Pinard P, Havard S, Volatier J-L. The Third French Individual and National Food Consumption (INCA3) Survey 2014–2015: method, design and participation rate in the framework of a European harmonization process. Public Health Nutr. 2019;22:584–600.

31. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA3) [Internet]. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).; 2017. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf

32. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016 [Internet]. 2016. Available from: https://ciqual.anses.fr/

33. Monteiro CA, Cannon G, Levy R, Moubarac J-C, Jaime P, Martins AP, Canella D, Louzada M, Parra D. NOVA. The star shines bright. World Nutrition. 2016;7:28–38.

34. Monteiro CA, Levy RB, Claro RM, Castro IRR de, Cannon G. A new classification of foods based on the extent and purpose of their processing. Cad Saúde Pública. 2010;26:2039–49.

35. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2020 [Internet]. 2020. Available from: https://ciqual.anses.fr/

36. Etude NutriNet-Santé. Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database). Paris: Economica; 2013.

37. Anses. Actualisation des repères du PNNS : révision des repères de consommations alimentaires [Internet]. Maisons-Alfort, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).; 2016. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf

38. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, Paineau D, Huneau J-F. Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. Cameron DW, editor. PLoS ONE. 2012;7:e42155.

39. Anses. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « Actualisation des références nutritionnelles françaises en vitamines et minéraux » ; saisine n°2018-SA-0238. Saisine liée n°2012-SA-0103. In press;

40. Salomé M, Kesse-Guyot E, Fouillet H, Touvier M, Hercberg S, Huneau J-F, Mariotti F. Development and evaluation of a new dietary index assessing nutrient security by aggregating probabilistic estimates of the risk of nutrient deficiency in two French adult populations. Br J Nutr. 2020;1–34.

41. Salomé M, de Gavelle E, Dufour A, Dubuisson C, Volatier J-L, Fouillet H, Huneau J-F, Mariotti F. Plant-Protein Diversity Is Critical to Ensuring the Nutritional Adequacy of Diets When Replacing Animal With Plant Protein: Observed and Modeled Diets of French Adults (INCA3). J Nutr. 2020;150:536–45.

42. Committee to Review the Dietary Reference Intakes for Sodium and Potassium, Food and Nutrition Board, Health and Medicine Division, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Dietary Reference Intakes for Sodium and Potassium [Internet]. Stallings VA, Harrison M, Oria M, editors. Washington, D.C.: National Academies Press; 2019 [cited 2020 Dec 4]. Available from: https://www.nap.edu/catalog/25353

43. Shang X. Dietary protein from different food sources, incident metabolic syndrome and changes in its components: An 11-year longitudinal study in healthy community-dwelling adults. Clin Nutr. 2017;36:1540–8.

44. Farvid MS, Ding M, Pan A, Sun Q, Chiuve SE, Steffen LM, Willett WC, Hu FB. Dietary Linoleic Acid and Risk of Coronary Heart Disease: A Systematic Review and Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies. Circulation. 2014;130:1568–78.

45. Sanders TAB. Polyunsaturated Fatty Acid Status in Vegetarians. Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention. Elsevier; 2017. p. 667–81.

46. Veronese N, Solmi M, Caruso MG, Giannelli G, Osella AR, Evangelou E, Maggi S, Fontana L, Stubbs B, Tzoulaki I. Dietary fiber and health outcomes: an umbrella review of systematic reviews and meta-analyses. Am J Clin Nutr. 2018;107:436–44.

47. Bath SC, Hill S, Infante HG, Elghul S, Nezianya CJ, Rayman MP. Iodine concentration of milk-alternative drinks available in the UK in comparison with cows' milk. Br J Nutr. 2017;118:525–32.

48. Phillips DIW. Iodine, milk, and the elimination of endemic goitre in Britain: the story of an accidental public health triumph. J Epidemiol Community Health. 1997;51:391–3.

49. Ma W, He X, Braverman L. Iodine Content in Milk Alternatives. Thyroid. 2016;26:1308–10.

50. Benoist B de, Andersson M, Egli I, Takkouche B, Allen H, WHO, Department of Nutrition for Health and Development. Iodine status worldwide WHO global database on iodine deficiency. Geneva: World Health Organization, Department of Nutrition for Health and Development; 2004.

51. Bouga M, Lean MEJ, Combet E. Contemporary challenges to iodine status and nutrition: the role of foods, dietary recommendations, fortification and supplementation. Proc Nutr Soc. 2018;77:302–13.

52. Halkjær J, Olsen A, Bjerregaard LJ, Deharveng G, Tjønneland A, Welch AA, Crowe FL, Wirfält E, Hellstrom V, Niravong M, et al. Intake of total, animal and plant proteins, and their food sources in 10 countries in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition. Eur J Clin Nutr. 2009;63:S16–36.

53. Gehring J, Touvier M, Baudry J, Julia C, Buscail C, Srour B, Hercberg S, Péneau S, Kesse-Guyot E, Allès B. Consumption of Ultra-Processed Foods by Pesco-Vegetarians, Vegetarians, and Vegans: Associations with Duration and Age at Diet Initiation. J Nutr. 2021;151:120–31.

54. Van Mierlo K, Rohmer S, Gerdessen JC. A model for composing meat replacers: Reducing the environmental impact of our food consumption pattern while retaining its nutritional value. J Clean Prod. 2017;165:930–50.

Supplemental Method 1. Application of the NOVA classification to the INCA3 study.

The NOVA classification (1) was used to assess the degree of food processing of each food product in the INCA3 database. This classification encompasses four groups: 1) unprocessed/minimally processed foods (MPF), 2) processed culinary ingredients, 3) processed foods (PF) and 4) ultra-processed foods (UPF). To discriminate different foods between these categories, the classification takes account of the technical processing technique, the presence of additives and product composition.

For most of the food items consumed, the method of preparation was known and we were able to identify where the food items came from. If the food was homemade, eaten in a restaurant or prepared by an artisan, it was broken down into its ingredients to which the NOVA classification was applied. If the food was industrially processed or came from a fast food restaurant, the NOVA classification was applied directly to the food item. If the method of preparation was unknown, we assigned the processing method most commonly used for this particular food. For each participant we were able to calculate the proportion (%) of total energy intake from MPF, processed culinary ingredients, PF and UPF.

In the present study, only the proportion of total energy intake from UPF was considered.

Supplemental Table 1. List of plant-based substitutes categorized by the type of substitute (meat, milk or dairy dessert substitute), its category and the main constituting ingredient.

Type of substitute	Substitute category	Main constituting ingredient of substitute	Substitute name	UPF	Data-base of origin[1]
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Broad bean, boiled/cooked in water	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Haricot bean, boiled/cooked in water	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Red kidney bean, boiled/cooked in water	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Lentil, boiled/cooked in water	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Split pea, boiled/cooked in water	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Flageolet bean, canned, drained	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Lentil, seasoned, canned, drained	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Haricot bean, canned, drained	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Flageolet bean, boiled/cooked in water	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Red kidney bean, canned, drained	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Mung bean, boiled/cooked in water	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Chick pea, canned, drained	No	(2)
Meat substitute	Cooked pulses	Pulse-based	Legume, cooked (average)	No	(2)
Meat substitute	Tofu, tempeh or soy protein	Soy-based	Soy protein, textured, rehydrated	Yes	(3)
Meat substitute	Tofu, tempeh or soy protein	Soy-based	Tofu, plain	No	(3)
Meat substitute	Tofu, tempeh or soy protein	Soy-based	Tempeh	No	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Cereal-based	Cereal burger with cheese (without soybean)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Cereal-based	Cereal burger with vegetables (without soybean)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Cereal-based	Plant-based burger or steak from wheat (seitan) and vegetables	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Pulse-based	Plant-based burger or steak from lentil, soybean and vegetables	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Pulse-based	Plant-based burger from red kidney bean	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Pulse-based	Plant-based burger from lentil	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Soy burger or vegetable escalope	Yes	(2)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger or steak from soybean and cheese	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger or steak from soybean and vegetables	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger or steak from soybean, cheese and vegetables	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with curry #1	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with curry #2	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with tomatoes and sweet pepper #1	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with tomatoes and sweet pepper #2	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with herbs #1	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with herbs #2	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with vegetables #1	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with vegetables #1	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with tomatoes and basil #1	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy-based	Plant-based burger from soybean with tomatoes and basil #2	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy & Wheat-based	Plant-based burger or steak from wheat and soybean (vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy & Wheat-based	Plant-based burger or steak from wheat and soybean (not vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based burger	Soy & Wheat-based	Plant-based burger from cereals and soybean	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based sausage	Cereal-based	Plant-based sausage with wheat or seitan	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based sausage	Cereal-based	Plant-based sausage with wheat	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based sausage	Soy-based	Plant-based sausage with tofu (vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based sausage	Soy-based	Plant-based sausage with tofu (not vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based sausage	Soy-based	Plant-based sausage with tofu	Yes	(4)
Meat substitute	Plant-based meat ball or bite	Pulse-based	Falafel	Yes	(2)
Meat substitute	Plant-based meat ball or bite	Pulse-based	Falafel, prepacked	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based meat ball or bite	Soy & Wheat-based	Soy and wheat burger or bite (vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based meat ball or bite	Soy & Wheat-based	Soy and wheat burger or bite (not vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based meat ball or bite	Soy & Wheat-based	Plant-based ball with wheat and/or soybean	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based breaded food	Cereal-based	Wheat-based nuggets (wo soybean)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based breaded food	Soy & Wheat-based	Soybean and wheat-based nuggets (not vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based breaded food	Soy & Wheat-based	Soybean and wheat-based nuggets (vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based breaded food	Soy & Wheat-based	Schnitzel, soybean and wheat-based (not vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based breaded food	Soy & Wheat-based	Schnitzel, soybean and wheat-based (vegan)	Yes	(3)
Meat substitute	Plant-based breaded food	Soy & Wheat-based	Schnitzel, soybean, wheat and cheese-based, cordon bleu-style	Yes	(3)
Milk substitute	Plain plant-based milk	Cereal-based	Oat drink, plain	Yes	(4)
Milk substitute	Plain plant-based milk	Nut-based	Almond drink not sweet, not fortified, prepacked #1	Yes	(2)

Milk substitute	Plain plant-based milk	Nut-based	Almond drink not sweet, not fortified, prepacked #2	Yes	(3)
Milk substitute	Plain plant-based milk	Nut-based	Coconut-based drink, plain, prepacked	Yes	(3)
Milk substitute	Plain plant-based milk	Nut-based	Almond drink, plain	Yes	(4)
Milk substitute	Plain plant-based milk	Soy-based	Soy drink, plain, prepacked	Yes	(2)
Milk substitute	Plain plant-based milk	Soy-based	Soy drink, plain	Yes	(4)
Milk substitute	Plain plant-based milk, calcium-fortified	Nut-based	Almond-based drink, sweet, fortified with calcium, prepacked	Yes	(3)
Milk substitute	Plain plant-based milk, calcium-fortified	Soy-based	Soy drink, plain, fortified with calcium, prepacked	Yes	(2)
Milk substitute	Plain plant-based milk, calcium-fortified	Soy-based	Soy drink, plain, fortified with calcium	Yes	(4)
Milk substitute	Sweet plant-based milk	Cereal-based	Spelt drink, plain	Yes	(4)
Milk substitute	Sweet plant-based milk	Cereal-based	Rice drink, plain	Yes	(4)
Milk substitute	Sweet plant-based milk	Nut-based	Chestnut drink, plain	Yes	(4)
Milk substitute	Sweet plant-based milk	Soy-based	Soy drink, sweet, flavored, with sugar, prepacked	Yes	(2)
Milk substitute	Sweet plant-based milk, calcium-fortified	Nut-based	Chestnut-based drink, plain, prepacked	Yes	(3)
Milk substitute	Sweet plant-based milk, calcium-fortified	Soy-based	Soy drink, flavored, fortified with calcium	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Plain plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, plain, not fortified, prepacked	Yes	(3)
Dairy dessert substitute	Plain plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, plain	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Plain plant-based dessert, calcium-fortified	Soy-based	Soy dessert, plain, prepacked	Yes	(2)
Dairy dessert substitute	Plain plant-based dessert, calcium-fortified	Soy-based	Soy dessert, plain, fortified with calcium, prepacked	Yes	(3)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, w fruits, sweet, not fortified, prepacked	Yes	(3)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, flavored, sweet, not fortified, prepacked	Yes	(3)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, with fruits #1	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, with fruits #2	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, flavored #1	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, flavored #2	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Soy-based	Soy dessert, flavored #3	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Non soy-based	Plant-based dessert, without soy #1	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Non soy-based	Plant-based dessert, without soy #2	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert	Non soy-based	Plant-based dessert (almond, oat, hemp, coconut, rice), flavored, sweet, not fortified, prepacked	Yes	(3)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert, calcium fortified	Soy-based	Soy dessert, w fruits, sweet, fortified with calcium, prepacked #1	Yes	(2)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert, calcium fortified	Soy-based	Soy dessert, w fruits, sweet, fortified with calcium, prepacked #2	Yes	(3)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert, calcium fortified	Soy-based	Soy dessert, flavored, sweet, fortified with calcium, prepacked #1	Yes	(2)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert, calcium fortified	Soy-based	Soy dessert, flavored, sweet, fortified with calcium, prepacked #2	Yes	(3)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert, calcium fortified	Soy-based	Soy dessert, with fruits #3	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert, calcium fortified	Soy-based	Soy dessert, with fruits #4	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert, calcium fortified	Soy-based	Soy dessert, flavored #4	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Sweet plant-based dessert, calcium fortified	Non soy-based	Plant-based dessert without soybean (coconut, rice), with fruits, sweet, fortified with calcium, prepacked	Yes	(3)
Dairy dessert substitute	Plant-based mousse	Soy-based	Soy mousse, chocolate, pant-based	Yes	(4)
Dairy dessert substitute	Plant-based mousse	Non soy-based	Mousse, chocolate, plant-based, prepacked	Yes	(3)

1Three nutritional composition databases were used to complete this list: CIQUAL French composition table version 2016 (2), CIQUAL French composition table version 2020 (3) and the NutriNet-Santé Study Food composition database (4).
UPF, Ultra-processed foods

Supplemental Table 2. Reference values of the PANDiet scoring system, version 3.2 (5–7).

PANDiet score
Average of Adequacy and Moderation subscores

Adequacy subscore		
Nutrient	**Reference value (/day)(7)**	**Variability**
Protein	0.66 or 0.8 g/kg bw	12.5%
LA	3.08% EIEA	15%
ALA	0.769% EIEA	15%
DHA	0.192 g	15%
EPA + DHA	0.385 g	15%
Fiber	23 g	15%
Vitamin A	580 or 490 µg	15%
Thiamin	0.3 mg/1000 kcal	20%
Riboflavin	1.3 mg	10%
Niacin	5.44 mg NE/1000kcal	10%
Pantothenic acid	3.33 or 2.78 mg	40%
Vitamin B-6	1.5 or 1.3 mg	10%
Folate	250 µg	15%
Vitamin B-12	3.33 µg	10%
Vitamin C	90 mg	10%
Vitamin D	10 µg	25%
Vitamin E	5.26 or 4.74 mg	45%
Calcium	860 (<= 24 y.o) or 750 mg (>24 y.o.)	15% or 13%
Copper	0.86 or 0.68 mg	60%
Iodine	107 µg	20%
Bioavailable iron	See supplemental method 1 in de Gavelle et al. (6)	
Magnesium	224 or 176 mg	35%
Manganese	1.89 or 1.56 mg	40%
Phosphorus	Calcium (mmol) / 1.65 *Cf.* phosphorus section in de Gavelle et al. (6)	7.5% + CV Calcium (mg)
Potassium	2692 mg	15%
Selenium	54 µg	15%
Bioavailable zinc	0.642 + 0.038 x bw	10%

Moderation subscore		
Nutrient	**Reference value (/day)(7)**	**Variability**
Protein	2.2 g/kg bw	12.5%
Total fat	44% EIEA	5%
SFA	12% EIEA	15%
Carbohydrates	60.5% EIEA	5%
Sugars	100 g	15%
Sodium	3200 mg	15%

Tolerable Upper Intake Limits	
Retinol	3000 µg
Niacin	900 mg
Vitamin B-6	25 mg
Folate	1170 µg
Vitamin D	100 µg
Vitamin E	300 mg
Calcium	2500 mg
Copper	10 mg
Iodine	600 µg
Dissociable magnesium	250 mg
Selenium	300 µg
Zinc	25 mg

ALA, alpha-linolenic acid; bw, body weight; CV, coefficient of variation; DHA, docosahexaenoic acid; EIEA, energy intake excluding alcohol; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; NE, niacin equivalent; SFA, saturated fatty acids.

The PANDiet score is expressed as the average of an adequacy subscore (AS – accounting for 27 nutrients) and a moderation subscore (MS – accounting for six nutrients, plus 12 potential penalty values). DHA and EPA+DHA are weighted by a factor of 1/2 as DHA is present twice. Niacin equivalents are calculated as the sum of dietary niacin and 1/60 dietary tryptophan. The upper reference value for sugars excludes lactose. The tolerable upper intake limit for vitamin A concerns retinol only. The PANDiet 3.2 version is based on the dietary reference intake from the ANSES opinion (7) and complete construction of the score has been described elsewhere (5).

Compared to the PANDiet 3.1 version, the references values have been updated for vitamin A, pantothenic acid, vitamin E, copper, magnesium, manganese and sodium in order to take account of the latest ANSES opinion (7).

For vitamin A, the average requirement for men has been readjusted to 580 µg/day rather than 570 µg/day. For pantothenic acid, vitamin E, copper, magnesium and manganese an adequate intake has been defined based on recent observed intake from the INCA3 survey. Then, to calculate PANDiet, a pseudo average intake has been derived by considering the coefficient of variation of intake in the French population. For sodium, an upper limit intake has been defined by ANSES at 2300mg/day, which is based on the sodium Chronic Disease Risk Reduction Intake (CDRR)

defined by the HMD (8). From a literature review, the HMD has determined that with a sodium intake of between 2300mg/day and 4100mg/day, any reduction in sodium intake would lead to a reduced risk of chronic disease. From this, we hypothesized that 2.5% of the population would be at a higher risk of chronic disease with a sodium intake of 2300mg/day, and 97.5% of the population would be at a higher risk of chronic disease with a sodium intake of 4100 mg/day. We could then derive a risk curve and define a mean intake at which 50% of the population would be at higher risk, which is 3200 mg and a CV of 15%.

For zinc, the calculation of bioavailable zinc was updated and the following mathematical model was used to calculate bioavailable zinc from dietary zinc and phytate intakes (9):

$$TAZ = 0.5 \times \left(0.033 \times \left(1 + \frac{TDP}{0.68}\right) + 0.091 + TDZ - \sqrt{\left(0.033 \times \left(1 + \frac{TDP}{0.68}\right) + 0.091 + TDZ\right)^2 - 4 \times 0.091 \times TDZ} \right)$$

TAZ: total absorbed zinc (mmol), TDZ: total dietary zinc (mmol) and TDP: total dietary phytate (mmol).

Supplemental Table 3. Nutrients included as components in the SecDiet score and associated deficiency and threshold values.

Nutrients were included in the SecDiet score if clinical signs of deficiency might appear because of insufficient intakes. The threshold value (DT) was defined as the minimal intake below which there is a risk of appearance of a deficiency. The reference value used to calculate the probability of adequacy of the average deficiency threshold (aDT), which corresponds to the intake at which 50% of the population is at risk of nutritional deficiency. The complete construction of the score has been fully described elsewhere (10).

Nutrient	Deficiency	Threshold (DT)	CV	50% of risk (aDT)
Vitamin A(11)	Xerophtalmia	300 µg RE or 270 µg RE	15%	231 µg RE or 208 µg RE
Thiamin(12)	Beriberi	0.18 mg/1000kcal	20%	0.13 mg/1000kcal
Riboflavin(12)	Ariboflavinosis	1.0 mg	10%	0.83 mg
Niacin(12)	Pellagra	4.35 mg NE/1000kcal	10%	3.63 NE/1000kcal
Folate(12)	Megaloblastic anemia	175 µg	15%	135 µg
Vitamin B-12(13)	Megaloblastic anemia	1 µg	15%	0.77 µg
Vitamin C(11)	Scurvy	10 mg	10%	8.3 mg
Iodine*(12)	Goiter	150 µg	20%	107 µg
Selenium(14)	Keshan disease	21 µg or 16 µg	15%	16.2 µg or 12.3 µg
Bioavailable iron*(15)	Anemia	1.74 mg†	40%	0.95 mg†
Bioavailable zinc(16)	Zinc deficiency	1.6 mg or 1.3 mg	15%	1.23mg or 1.0 mg
Calcium(17–19)	Fracture risk (long-term)	500 mg	15%	385 mg

DT, deficiency threshold; CV, coefficient of variation of the individual threshold; aDT, average deficiency threshold; RE, retinol equivalent; NE, niacin equivalent.

* These thresholds parameters were then further corrected to calibrate the estimated average risk using figures for the national prevalence of goiter for iodine and anemia for iron. For iodine, the recalibrated DT was set at 100 µg and the aDT at 71.3 µg. For iron, the recalibrated DT was set at 0.70mg and the aDT at 0.38 (see (10))

† This value applies to men and non-menstruating women. Requirements for menstruating women were estimated by considering menstrual losses using a Monte-Carlo simulation (see (10)).

Supplemental Table 4. PANDiet, AS, MS and probabilities of adequacies for the initial diet and differences observed in different scenarios of substitutions of meat items with meat substitutes according to the substitute's category in French adults (n=1949)[1].

		MEAT SUBSTITUTION MODEL						
		Simulation of substitution of meat items with meat substitute according to the substitute's category[3]						
	Initial diet[2]	Cooked pulses	Tofu, tempeh or soy protein	Plant-based burgers	Plant-based sausages	Plant-based meat balls or slices	Plant-based breaded foods	P[4] (model)
PANDiet score (0-100)	68.33 (67.97, 68.69)	+0.04 (-0.54, 0.61)	+1.58 (1.01, 2.16)*	+0.34 (-0.24, 0.92)	-0.60 (-1.18, -0.02)*	+0.46 (-0.11, 1.04)	+0.25 (-0.33, 0.83)	<0.0001
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	63.66 (62.84, 64.47)	-1.03 (-2.34, 0.27)	+0.88 (-0.43, 2.19)	+0.13 (-1.17, 1.44)	-1.46 (-2.77, -0.16)*	-0.10 (-1.4, 1.21)	-2.02 (-3.33, -0.71)*	<0.0001
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)								
Protein	0.85 (0.83, 0.86)	-0.11 (-0.14, -0.09)*	-0.04 (-0.06, -0.01)*	-0.09 (-0.11, -0.06)*	-0.04 (-0.07, -0.02)*	-0.08 (-0.11, -0.05)*	-0.09 (-0.11, -0.06)*	<0.0001
LA	0.46 (0.44, 0.47)	-0.05 (-0.08, -0.02)*	+0.24 (0.22, 0.27)*	+0.22 (0.19, 0.24)*	+0.30 (0.27, 0.33)*	+0.26 (0.23, 0.29)*	+0.33 (0.30, 0.35)*	<0.0001
ALA	0.12 (0.11, 0.14)	+0.03 (0.01, 0.05)*	+0.12 (0.10, 0.15)*	+0.07 (0.04, 0.09)*	+0.06 (0.04, 0.08)*	+0.04 (0.02, 0.07)*	+0.04 (0.02, 0.06)*	<0.0001
DHA	0.22 (0.20, 0.24)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.01 (-0.04, 0.02)	0.00 (-0.04, 0.03)	-0.01 (-0.04, 0.02)	0.9426
EPA+DHA	0.20 (0.18, 0.21)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.01 (-0.03, 0.02)	-0.01 (-0.03, 0.02)	-0.01 (-0.04, 0.02)	0.9230
Fiber	0.34 (0.32, 0.36)	+0.26 (0.23, 0.29)*	+0.17 (0.14, 0.20)*	+0.19 (0.16, 0.22)*	+0.06 (0.03, 0.09)*	+0.22 (0.19, 0.25)*	+0.13 (0.10, 0.16)*	<0.0001
Vitamin A	0.49 (0.47, 0.51)	+0.01 (-0.03, 0.04)	-0.01 (-0.04, 0.03)	+0.01 (-0.03, 0.04)	-0.01 (-0.04, 0.03)	-0.02 (-0.05, 0.01)	-0.04 (-0.07, 0.00)*	0.0006
Thiamine	0.97 (0.96, 0.97)	0.00 (-0.01, 0.01)	-0.02 (-0.03, -0.01)*	0.00 (-0.01, 0.01)	-0.02 (-0.03, -0.01)*	-0.01 (-0.02, 0.00)*	-0.02 (-0.02, -0.01)*	<0.0001
Riboflavin	0.74 (0.72, 0.76)	-0.05 (-0.08, -0.01)*	-0.06 (-0.09, -0.02)*	-0.07 (-0.10, -0.04)*	-0.07 (-0.10, -0.03)*	-0.08 (-0.11, -0.05)*	-0.10 (-0.13, -0.07)*	<0.0001
Niacin	0.998 (0.997, 0.998)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	-0.002 (-0.003, 0.00)*	-0.003 (-0.004, -0.001)*	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	<0.0001
Pantothenic acid	0.86 (0.85, 0.87)	-0.03 (-0.05, -0.01)*	-0.02 (-0.04, 0.00)*	-0.04 (-0.06, -0.02)*	-0.06 (-0.08, -0.05)*	-0.04 (-0.06, -0.02)*	-0.06 (-0.08, -0.05)*	<0.0001
Vitamin B-6	0.66 (0.64, 0.68)	-0.13 (-0.16, -0.09)*	-0.15 (-0.18, -0.12)*	-0.16 (-0.20, -0.13)*	-0.21 (-0.25, -0.18)*	-0.18 (-0.21, -0.15)*	-0.25 (-0.28, -0.22)*	<0.0001
Folate	0.63 (0.62, 0.65)	+0.16 (0.13, 0.19)*	+0.09 (0.06, 0.12)*	+0.1 (0.08, 0.13)*	+0.02 (0.00, 0.05)	+0.11 (0.08, 0.14)*	+0.01 (-0.01, 0.04)	<0.0001
Vitamin B-12	0.62 (0.6, 0.64)	-0.22 (-0.25, -0.18)*	-0.23 (-0.26, -0.20)*	-0.23 (-0.26, -0.20)*	-0.24 (-0.28, -0.21)*	-0.24 (-0.27, -0.21)*	-0.25 (-0.29, -0.22)*	<0.0001
Vitamin C	0.43 (0.41, 0.46)	+0.02 (-0.01, 0.06)	0 (-0.03, 0.04)	+0.01 (-0.02, 0.05)	0.00 (-0.04, 0.03)	-0.01 (-0.04, 0.03)	-0.02 (-0.06, 0.02)	0.0190
Vitamin D	0.03 (0.03, 0.04)	0.00 (-0.01, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.01)	-0.01 (-0.01, 0.00)	0.3876
Vitamin E	0.82 (0.81, 0.83)	+0.01 (0.00, 0.03)	+0.03 (0.01, 0.04)*	+0.05 (0.03, 0.06)*	+0.11 (0.09, 0.12)*	+0.08 (0.07, 0.10)*	+0.10 (0.09, 0.12)*	<0.0001
Iodine	0.69 (0.67, 0.70)	+0.01 (-0.02, 0.04)	+0.04 (0.01, 0.06)*	+0.02 (-0.01, 0.04)	0.00 (-0.03, 0.03)	+0.01 (-0.02, 0.04)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.0002
Magnesium	0.86 (0.85, 0.87)	+0.02 (0.01, 0.04)*	+0.06 (0.05, 0.08)*	+0.06 (0.04, 0.07)*	+0.02 (0.00, 0.03)*	+0.04 (0.02, 0.05)*	+0.01 (0.00, 0.02)	<0.0001
Phosphorus	0.97 (0.97, 0.98)	-0.01 (-0.01, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.00)	-0.01 (-0.01, 0.00)*	0.00 (-0.01, 0.00)	-0.01 (-0.01, 0.00)*	0.0054
Potassium	0.62 (0.6, 0.64)	+0.01 (-0.02, 0.04)	+0.03 (0.00, 0.06)*	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.07 (-0.10, -0.04)*	+0.05 (0.01, 0.08)*	-0.02 (-0.05, 0.01)	<0.0001
Selenium	0.93 (0.93, 0.94)	-0.01 (-0.02, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.02)	0.00 (-0.02, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.02)	0.00 (-0.01, 0.02)	-0.01 (-0.02, 0.01)	0.0035
Zinc	0.31 (0.3, 0.33)	-0.20 (-0.22, -0.18)*	-0.14 (-0.16, -0.12)*	-0.15 (-0.17, -0.13)*	-0.18 (-0.20, -0.16)*	-0.17 (-0.19, -0.15)*	-0.20 (-0.22, -0.17)*	<0.0001
Copper	0.86 (0.85, 0.87)	+0.03 (0.02, 0.05)*	+0.06 (0.05, 0.08)*	+0.04 (0.03, 0.05)*	+0.02 (0.01, 0.04)*	+0.04 (0.03, 0.05)*	+0.02 (0.01, 0.03)*	<0.0001
Manganese	0.87 (0.86, 0.88)	+0.05 (0.04, 0.06)*	+0.08 (0.07, 0.09)*	+0.08 (0.07, 0.09)*	+0.07 (0.06, 0.08)*	+0.07 (0.06, 0.08)*	+0.06 (0.04, 0.07)*	<0.0001
Calcium	0.60 (0.58, 0.62)	+0.06 (0.03, 0.09)*	+0.09 (0.05, 0.12)*	+0.08 (0.04, 0.11)*	+0.06 (0.03, 0.09)*	+0.05 (0.01, 0.08)*	+0.03 (0.00, 0.06)	<0.0001
Iron	0.61 (0.6, 0.63)	-0.16 (-0.18, -0.13)*	-0.13 (-0.16, -0.11)*	-0.12 (-0.14, -0.09)*	-0.17 (-0.20, -0.15)*	-0.16 (-0.18, -0.13)*	-0.18 (-0.21, -0.16)*	<0.0001
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	73.01 (72.29, 73.72)	+1.11 (-0.03, 2.25)	+2.29 (1.15, 3.43)*	+0.55 (-0.60, 1.69)	+0.27 (-0.87, 1.41)	+1.02 (-0.12, 2.16)	+2.51 (1.37, 3.66)*	<0.0001
Probabilities of adequacy for MS components (0-1)								
Carbohydrates	0.96 (0.95, 0.96)	-0.07 (-0.08, -0.06)*	-0.02 (-0.03, -0.01)*	-0.03 (-0.05, -0.02)*	0.00 (-0.02, 0.01)	-0.01 (-0.03, 0.00)*	-0.01 (-0.02, 0.00)	<0.0001
Protein	0.96 (0.95, 0.96)	+0.03 (0.02, 0.04)*	+0.01 (0.01, 0.02)*	+0.02 (0.01, 0.03)*	+0.01 (0.00, 0.02)*	+0.02 (0.01, 0.03)*	+0.02 (0.02, 0.03)*	<0.0001
Total fat	0.90 (0.89, 0.91)	+0.04 (0.02, 0.05)*	+0.02 (0.01, 0.04)*	+0.02 (0.00, 0.03)*	-0.01 (-0.02, 0.01)	+0.01 (0.00, 0.03)	+0.01 (-0.01, 0.02)	<0.0001
SFA	0.30 (0.28, 0.32)	+0.10 (0.07, 0.13)*	+0.10 (0.07, 0.13)*	+0.10 (0.07, 0.13)*	+0.10 (0.07, 0.13)*	+0.12 (0.09, 0.15)*	+0.14 (0.11, 0.17)*	<0.0001
Sodium	0.57 (0.55, 0.59)	-0.01 (-0.04, 0.03)	+0.03 (0.00, 0.06)	-0.07 (-0.10, -0.04)*	-0.10 (-0.13, -0.06)*	-0.08 (-0.11, -0.05)*	-0.03 (-0.07, 0.00)*	<0.0001
Sugars without lactose	0.71 (0.69, 0.73)	-0.03 (-0.06, 0.00)	-0.02 (-0.05, 0.01)	-0.02 (-0.05, 0.01)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.01 (-0.04, 0.02)	+0.01 (-0.02, 0.04)	0.0005

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (n=2121) where only meat consumers where selected (n=1949). ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; SFA, saturated fatty acids.
[2] Values are means with a 95% confidence interval.
[3] Values are differences in means between the simulated diet and the initial diet with a 95% confidence interval of the difference. * Mean of the simulated diet significantly different from the mean of the initial diet.
[4] *P* for ANOVA tests, post-hoc tests were performed after a Bonferroni correction for multiple comparisons.

Supplemental Table 5. PANDiet, AS, MS and probabilities of adequacies for the initial diet and differences observed in different scenarios of substitutions of meat items with meat substitutes according to the substitute's main constituting ingredient in French adults (n=1949)[1].

	MEAT SUBSTITUTION MODEL					
	Initial diet[2]	Simulation of substitution of meat items with meat substitute according to the substitute's main constituting ingredient[3]				P[4] (model)
		Soy-based substitutes	Cereal-based substitutes	Pulse-based substitutes	Soy & Wheat-based substitutes	
PANDiet score (0-100)	68.33 (67.99, 68.68)	+0.57 (0.04, 1.10)*	-0.72 (-1.25, -0.19)*	+0.09 (-0.44, 0.63)	+0.45 (-0.09, 0.98)	<0.0001
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	63.66 (62.87, 64.44)	+0.57 (-0.64, 1.79)	-3.08 (-4.29, -1.86)*	-0.86 (-2.08, 0.36)	-0.51 (-1.73, 0.70)	<0.0001
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)						
Protein	0.85 (0.83, 0.86)	-0.07 (-0.09, -0.04)*	-0.09 (-0.11, -0.06)*	-0.12 (-0.14, -0.09)*	-0.07 (-0.09, -0.04)*	<0.0001
LA	0.46 (0.44, 0.47)	+0.27 (0.25, 0.30)*	+0.18 (0.16, 0.21)*	+0.01 (-0.01, 0.04)	+0.27 (0.25, 0.30)*	<0.0001
ALA	0.12 (0.11, 0.14)	+0.09 (0.07, 0.11)*	-0.01 (-0.03, 0.02)	+0.04 (0.02, 0.06)*	+0.05 (0.03, 0.07)*	<0.0001
DHA	0.22 (0.21, 0.24)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.01 (-0.04, 0.02)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.01 (-0.03, 0.02)	0.9152
EPA+DHA	0.20 (0.18, 0.21)	0.00 (-0.03, 0.02)	-0.01 (-0.04, 0.02)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.01 (-0.03, 0.02)	0.8685
Fiber	0.34 (0.32, 0.36)	+0.17 (0.15, 0.20)*	+0.10 (0.07, 0.13)*	+0.25 (0.22, 0.28)*	+0.17 (0.14, 0.20)*	<0.0001
Vitamin A	0.49 (0.47, 0.51)	+0.01 (-0.02, 0.04)	-0.03 (-0.06, 0.00)	+0.01 (-0.03, 0.04)	-0.02 (-0.05, 0.01)	0.0034
Thiamine	0.97 (0.96, 0.97)	0.00 (-0.01, 0.00)	-0.02 (-0.02, -0.01)*	0.00 (-0.01, 0.01)	-0.01 (-0.02, 0.00)*	<0.0001
Riboflavin	0.74 (0.72, 0.76)	-0.06 (-0.09, -0.03)*	-0.10 (-0.13, -0.07)*	-0.06 (-0.09, -0.03)*	-0.08 (-0.11, -0.05)*	<0.0001
Niacin	0.998 (0.997, 0.998)	-0.001 (-0.002, 0.00)*	-0.002 (-0.003, -0.001)*	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	<0.0001
Pantothenic acid	0.86 (0.85, 0.87)	-0.04 (-0.06, -0.02)*	-0.06 (-0.08, -0.04)*	-0.03 (-0.05, -0.02)*	-0.05 (-0.07, -0.03)*	<0.0001
Vitamin B-6	0.66 (0.64, 0.68)	-0.16 (-0.19, -0.13)*	-0.24 (-0.27, -0.21)*	-0.14 (-0.17, -0.11)*	-0.21 (-0.24, -0.18)*	<0.0001
Folate	0.63 (0.62, 0.65)	+0.10 (0.07, 0.12)*	+0.01 (-0.02, 0.04)	+0.15 (0.13, 0.18)*	+0.07 (0.05, 0.10)*	<0.0001
Vitamin B-12	0.62 (0.60, 0.64)	-0.23 (-0.26, -0.20)*	-0.25 (-0.28, -0.22)*	-0.22 (-0.26, -0.19)*	-0.24 (-0.27, -0.21)*	<0.0001
Vitamin C	0.43 (0.41, 0.45)	+0.02 (-0.02, 0.05)	-0.02 (-0.05, 0.01)	+0.02 (-0.02, 0.05)	-0.01 (-0.04, 0.02)	0.0099
Vitamin D	0.03 (0.03, 0.04)	0.00 (-0.01, 0.01)	-0.01 (-0.01, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.01)	0 (-0.01, 0.00)	0.3627
Vitamin E	0.82 (0.81, 0.83)	+0.04 (0.02, 0.05)*	+0.10 (0.09, 0.11)*	+0.03 (0.02, 0.05)*	+0.09 (0.07, 0.10)*	<0.0001
Iodine	0.69 (0.67, 0.70)	+0.01 (-0.02, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.02)	+0.01 (-0.01, 0.04)	+0.03 (0.00, 0.05)*	0.0038
Magnesium	0.86 (0.85, 0.87)	+0.06 (0.05, 0.08)*	0.00 (-0.01, 0.02)	+0.03 (0.01, 0.04)*	+0.04 (0.02, 0.05)*	<0.0001
Phosphorus	0.97 (0.97, 0.98)	0.00 (-0.01, 0.00)	-0.01 (-0.01, 0.00)*	-0.01 (-0.01, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.00)	0.0351
Potassium	0.62 (0.60, 0.64)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.06 (-0.09, -0.03)*	+0.01 (-0.02, 0.04)	+0.02 (-0.01, 0.05)	<0.0001
Selenium	0.93 (0.93, 0.94)	0.00 (-0.01, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.01)	-0.01 (-0.02, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.01)	0.4705
Zinc	0.31 (0.30, 0.33)	-0.14 (-0.16, -0.12)*	-0.19 (-0.21, -0.17)*	-0.20 (-0.22, -0.18)*	-0.18 (-0.20, -0.16)*	<0.0001
Copper	0.86 (0.85, 0.87)	+0.04 (0.03, 0.06)*	+0.01 (0.00, 0.03)*	+0.04 (0.02, 0.05)*	+0.04 (0.02, 0.05)*	<0.0001
Manganese	0.87 (0.86, 0.88)	+0.08 (0.07, 0.09)*	+0.06 (0.05, 0.08)*	+0.06 (0.04, 0.07)*	+0.07 (0.06, 0.08)*	<0.0001
Calcium	0.60 (0.58, 0.62)	+0.09 (0.06, 0.12)*	+0.01 (-0.02, 0.04)	+0.05 (0.02, 0.08)*	+0.05 (0.02, 0.08)*	<0.0001
Iron	0.61 (0.60, 0.63)	-0.12 (-0.14, -0.09)*	-0.20 (-0.23, -0.18)*	-0.15 (-0.18, -0.13)*	-0.15 (-0.17, -0.13)*	<0.0001
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	73.01 (72.33, 73.69)	+0.56 (-0.49, 1.61)	+1.63 (0.58, 2.68)*	+1.05 (0.00, 2.10)	+1.41 (0.35, 2.46)*	0.0001
Probabilities of adequacy for MS components (0-1)						
Carbohydrates	0.96 (0.95, 0.96)	-0.02 (-0.04, -0.01)*	-0.02 (-0.04, -0.01)*	-0.06 (-0.08, -0.05)*	-0.01 (-0.02, 0.00)	<0.0001
Protein	0.96 (0.95, 0.96)	+0.02 (0.01, 0.03)*	+0.02 (0.01, 0.03)*	+0.03 (0.02, 0.03)*	+0.02 (0.01, 0.03)*	<0.0001
Total fat	0.90 (0.90, 0.91)	+0.01 (0.00, 0.02)	+0.02 (0.01, 0.03)*	+0.03 (0.02, 0.05)*	+0.01 (0.00, 0.02)	<0.0001
SFA	0.30 (0.29, 0.32)	+0.10 (0.07, 0.12)*	+0.12 (0.09, 0.15)*	+0.10 (0.07, 0.13)*	+0.12 (0.09, 0.15)*	<0.0001
Sodium	0.57 (0.55, 0.59)	-0.07 (-0.10, -0.04)*	-0.05 (-0.08, -0.02)*	-0.02 (-0.05, 0.01)	-0.07 (-0.10, -0.04)*	<0.0001
Sugars without lactose	0.71 (0.69, 0.73)	-0.02 (-0.04, 0.01)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.03 (-0.06, 0.00)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.0229

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (n=2121) where only meat consumers where selected (n=1949). ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; SFA, saturated fatty acids.
[2] Values are means with a 95% confidence interval.
[3] Values are differences in means between the simulated diet and the initial diet with a 95% confidence interval of the difference. * Mean of the simulated diet significantly different from the mean of the initial diet.
[4] P for ANOVA tests, post-hoc tests were performed after a Bonferroni correction for multiple comparisons.

Supplemental Table 6. PANDiet, AS, MS and probabilities of adequacies of the initial diet and differences observed in different scenarios of substitutions of milk items with milk substitutes according to the substitute's category in French adults (n=837)[1].

		MILK SUBSTITUTION MODEL				
		Simulation of substitution of milk items with milk substitute according to the substitute's category[3]				
	Initial diet[2]	Plain plant-based milks	Plain plant-based milks, calcium-fortified	Sweet plant-based milks	Sweet plant-based milks, calcium-fortified	P[4] (model)
PANDiet score (0-100)	69.04 (68.51, 69.57)	-0.56 (-1.38, 0.26)	-0.24 (-1.06, 0.58)	-1.19 (-2.01, -0.37)*	-0.23 (-1.05, 0.59)	0.0005
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	64.81 (63.59, 66.02)	-0.7 (-2.57, 1.17)	-0.17 (-2.04, 1.71)	-1.89 (-3.76, -0.02)*	+0.19 (-1.68, 2.06)	0.0133
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)						
Protein	0.85 (0.83, 0.87)	-0.02 (-0.06, 0.01)	-0.01 (-0.05, 0.02)	-0.04 (-0.07, -0.01)*	-0.04 (-0.07, 0)*	0.0028
LA	0.43 (0.41, 0.46)	+0.14 (0.10, 0.19)*	+0.17 (0.13, 0.22)*	+0.15 (0.11, 0.19)*	+0.21 (0.16, 0.25)*	<0.0001
ALA	0.11 (0.09, 0.13)	+0.04 (0.02, 0.07)*	+0.04 (0.01, 0.06)*	+0.01 (-0.02, 0.04)	+0.01 (-0.01, 0.04)	<0.0001
DHA	0.22 (0.19, 0.25)	0.00 (-0.04, 0.05)	0.00 (-0.04, 0.05)	0.00 (-0.05, 0.04)	0 (-0.04, 0.04)	0.9928
EPA+DHA	0.19 (0.16, 0.22)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.00 (-0.04, 0.04)	0 (-0.04, 0.04)	0.9965
Fiber	0.32 (0.30, 0.35)	+0.05 (0.01, 0.10)*	+0.04 (-0.01, 0.08)	+0.02 (-0.03, 0.06)	+0.02 (-0.02, 0.07)	0.0076
Vitamin A	0.49 (0.46, 0.52)	0.00 (-0.05, 0.04)	0.00 (-0.05, 0.05)	-0.04 (-0.09, 0.01)	-0.01 (-0.05, 0.04)	0.0734
Thiamine	0.98 (0.97, 0.98)	-0.01 (-0.02, 0.00)*	-0.01 (-0.02, 0.00)*	-0.01 (-0.02, 0.00)	-0.01 (-0.02, 0.00)	0.0111
Riboflavin	0.80 (0.77, 0.83)	-0.09 (-0.13, -0.05)*	-0.09 (-0.13, -0.05)*	-0.14 (-0.18, -0.09)*	-0.07 (-0.11, -0.03)*	<0.0001
Niacin	0.998 (0.997, 0.999)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.8273
Pantothenic acid	0.89 (0.87, 0.90)	-0.04 (-0.06, -0.02)*	-0.05 (-0.07, -0.03)*	-0.04 (-0.07, -0.02)*	-0.05 (-0.07, -0.02)*	<0.0001
Vitamin B-6	0.66 (0.63, 0.69)	-0.01 (-0.06, 0.03)	-0.02 (-0.06, 0.03)	0.00 (-0.05, 0.04)	-0.02 (-0.07, 0.02)	0.6138
Folate	0.65 (0.62, 0.68)	0.00 (-0.04, 0.05)	+0.01 (-0.03, 0.06)	-0.03 (-0.07, 0.02)	-0.03 (-0.07, 0.02)	0.0237
Vitamin B-12	0.68 (0.65, 0.71)	-0.10 (-0.14, -0.06)*	-0.08 (-0.13, -0.04)*	-0.14 (-0.18, -0.09)*	-0.12 (-0.17, -0.08)*	<0.0001
Vitamin C	0.44 (0.41, 0.48)	-0.01 (-0.06, 0.04)	-0.01 (-0.06, 0.04)	-0.01 (-0.06, 0.04)	-0.02 (-0.07, 0.03)	0.7811
Vitamin D	0.04 (0.02, 0.05)	0.00 (-0.02, 0.01)	+0.01 (-0.01, 0.03)	-0.01 (-0.02, 0.01)	+0.30 (0.28, 0.32)*	<0.0001
Vitamin E	0.82 (0.80, 0.84)	+0.04 (0.01, 0.06)*	+0.02 (-0.01, 0.04)	+0.04 (0.01, 0.06)*	+0.01 (-0.02, 0.03)	<0.0001
Iodine	0.75 (0.73, 0.78)	-0.06 (-0.10, -0.03)*	-0.06 (-0.10, -0.02)*	-0.11 (-0.14, -0.07)*	-0.09 (-0.13, -0.05)*	<0.0001
Magnesium	0.86 (0.85, 0.88)	0.00 (-0.02, 0.03)	0.00 (-0.02, 0.03)	0.00 (-0.02, 0.03)	0.00 (-0.02, 0.03)	0.9761
Phosphorus	0.97 (0.96, 0.97)	0.00 (0.00, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.01)	+0.01 (0.00, 0.02)	-0.01 (-0.02, 0.00)	0.0024
Potassium	0.65 (0.62, 0.68)	-0.05 (-0.10, -0.01)*	-0.05 (-0.09, 0.00)*	-0.06 (-0.1, -0.01)*	-0.05 (-0.10, -0.01)*	<0.0001
Selenium	0.94 (0.93, 0.95)	+0.01 (-0.01, 0.03)	+0.01 (-0.01, 0.03)	0.00 (-0.02, 0.02)	+0.01 (-0.01, 0.03)	0.1464
Zinc	0.32 (0.29, 0.35)	-0.02 (-0.06, 0.02)	-0.02 (-0.06, 0.02)	-0.02 (-0.06, 0.02)	-0.03 (-0.08, 0.01)	0.2471
Copper	0.85 (0.84, 0.87)	+0.03 (0.01, 0.05)*	+0.03 (0.01, 0.05)*	+0.02 (0.00, 0.04)*	+0.01 (0.00, 0.03)	<0.0001
Manganese	0.86 (0.84, 0.87)	+0.04 (0.01, 0.06)*	+0.02 (0.00, 0.05)*	+0.05 (0.02, 0.07)*	+0.02 (0.00, 0.05)*	<0.0001
Calcium	0.70 (0.67, 0.73)	-0.16 (-0.21, -0.12)*	-0.03 (-0.08, 0.01)	-0.18 (-0.23, -0.14)*	-0.04 (-0.08, 0.01)	<0.0001
Iron	0.58 (0.56, 0.61)	+0.04 (0.00, 0.07)	+0.03 (0.00, 0.07)	+0.04 (0.01, 0.08)*	+0.03 (-0.01, 0.07)	0.0096
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	73.28 (72.21, 74.34)	-0.42 (-2.06, 1.22)	-0.31 (-1.95, 1.33)	-0.49 (-2.13, 1.15)	-0.64 (-2.28, 1.00)	0.8518
Probabilities of adequacy for MS components (0-1)						
Carbohydrates	0.95 (0.94, 0.96)	0.00 (-0.01, 0.02)	0.00 (-0.01, 0.02)	-0.02 (-0.04, -0.01)*	-0.02 (-0.04, -0.01)*	<0.0001
Protein	0.95 (0.94, 0.96)	+0.01 (-0.01, 0.02)	0.00 (-0.01, 0.02)	+0.01 (-0.01, 0.02)	+0.01 (-0.01, 0.02)	0.4662
Total fat	0.92 (0.91, 0.94)	-0.02 (-0.04, 0.00)	-0.01 (-0.03, 0.01)	+0.01 (-0.01, 0.03)	+0.01 (-0.01, 0.03)	<0.0001
SFA	0.30 (0.28, 0.33)	+0.02 (-0.02, 0.06)	+0.04 (-0.01, 0.08)	+0.07 (0.03, 0.11)*	+0.07 (0.03, 0.11)*	<0.0001
Sodium	0.58 (0.55, 0.61)	0.00 (-0.04, 0.05)	0.00 (-0.05, 0.05)	+0.01 (-0.03, 0.06)	+0.02 (-0.03, 0.07)	0.6399
Sugars without lactose	0.71 (0.68, 0.74)	-0.03 (-0.08, 0.01)	-0.04 (-0.09, 0.00)	-0.10 (-0.15, -0.06)*	-0.13 (-0.17, -0.08)*	<0.0001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (n=2121) where only milk consumers were selected (n=837). ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; SFA, saturated fatty acids.
[2] Values are means with a 95% confidence interval.
[3] Values are differences in means between the simulated diet and the initial diet with a 95% confidence interval of the difference. * Mean of the simulated diet significantly different from the mean of the initial diet.
[4] P for ANOVA tests, post-hoc tests were performed after a Bonferroni correction for multiple comparisons.

Supplemental Table 7. PANDiet, AS, MS and probabilities of adequacies of the initial diet and differences observed in different scenarios of substitutions of milk items with milk substitutes according to the substitute's main constituting ingredient in French adults (n=837)[1].

MILK SUBSTITUTION MODEL					
	Initial diet[1]	Simulation of substitution of milk items with milk substitute according to the substitute's main constituting ingredient[2]			P[3] (model)
		Soy-based substitutes	Cereal-based substitutes	Nut-based substitutes	
PANDiet score (0-100)	69.04 (68.52, 69.56)	+0.29 (-0.49, 1.06)	-1.08 (-1.85, -0.31)*	-1.19 (-1.96, -0.42)*	<0.0001
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	64.81 (63.63, 65.98)	+0.82 (-0.94, 2.57)	-1.60 (-3.36, 0.15)	-1.81 (-3.57, -0.05)*	0.0001
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)					
Protein	0.85 (0.83, 0.87)	0.00 (-0.04, 0.03)	-0.04 (-0.07, -0.01)*	-0.04 (-0.07, -0.01)*	<0.0001
LA	0.43 (0.41, 0.46)	+0.21 (0.17, 0.25)*	+0.16 (0.12, 0.20)*	+0.11 (0.07, 0.15)*	<0.0001
ALA	0.11 (0.09, 0.13)	+0.06 (0.03, 0.08)*	+0.05 (0.02, 0.07)*	0.00 (-0.03, 0.03)	<0.0001
DHA	0.22 (0.19, 0.25)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.9794
EPA+DHA	0.19 (0.17, 0.22)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.9974
Fiber	0.32 (0.30, 0.35)	+0.05 (0.01, 0.09)*	+0.02 (-0.02, 0.06)	+0.04 (0.00, 0.08)	0.0123
Vitamin A	0.49 (0.46, 0.52)	+0.03 (-0.01, 0.07)	-0.04 (-0.08, 0.01)	-0.04 (-0.08, 0.01)	<0.0001
Thiamine	0.98 (0.97, 0.98)	0.00 (-0.01, 0.00)	-0.01 (-0.02, 0.00)	-0.01 (-0.02, -0.01)*	0.0001
Riboflavin	0.80 (0.77, 0.83)	-0.06 (-0.10, -0.02)*	-0.13 (-0.17, -0.10)*	-0.12 (-0.16, -0.08)*	<0.0001
Niacin	0.998 (0.997, 0.999)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.6583
Pantothenic acid	0.89 (0.87, 0.90)	-0.04 (-0.06, -0.02)*	-0.04 (-0.06, -0.02)*	-0.05 (-0.07, -0.03)*	<0.0001
Vitamin B-6	0.66 (0.63, 0.69)	0.00 (-0.04, 0.04)	-0.01 (-0.05, 0.03)	-0.02 (-0.06, 0.02)	0.4509
Folate	0.65 (0.63, 0.68)	+0.03 (-0.01, 0.07)	-0.03 (-0.07, 0.01)	-0.02 (-0.07, 0.02)	0.0003
Vitamin B-12	0.68 (0.65, 0.71)	-0.07 (-0.11, -0.03)*	-0.13 (-0.18, -0.09)*	-0.13 (-0.17, -0.09)*	<0.0001
Vitamin C	0.44 (0.41, 0.48)	-0.01 (-0.06, 0.03)	-0.02 (-0.06, 0.03)	-0.01 (-0.05, 0.04)	0.8092
Vitamin D	0.04 (0.03, 0.04)	+0.10 (0.09, 0.12)*	-0.01 (-0.02, 0.01)	0.00 (-0.02, 0.01)	<0.0001
Vitamin E	0.82 (0.80, 0.84)	0.00 (-0.02, 0.02)	+0.05 (0.03, 0.08)*	+0.04 (0.02, 0.07)*	<0.0001
Iodine	0.75 (0.73, 0.77)	-0.08 (-0.12, -0.04)*	-0.12 (-0.16, -0.08)*	-0.06 (-0.09, -0.02)*	<0.0001
Magnesium	0.86 (0.85, 0.88)	+0.01 (-0.01, 0.03)	+0.01 (-0.01, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.02)	0.1480
Phosphorus	0.97 (0.96, 0.97)	0.00 (-0.01, 0.01)	+0.01 (0.00, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.01)	0.2189
Potassium	0.65 (0.62, 0.68)	-0.02 (-0.07, 0.02)	-0.07 (-0.11, -0.03)*	-0.07 (-0.11, -0.03)*	<0.0001
Selenium	0.94 (0.93, 0.95)	+0.01 (0.00, 0.03)	-0.01 (-0.03, 0.00)	+0.01 (0.00, 0.03)	0.0001
Zinc	0.32 (0.29, 0.35)	-0.01 (-0.05, 0.02)	0.00 (-0.04, 0.04)	-0.04 (-0.08, 0.00)	0.0328
Copper	0.85 (0.84, 0.87)	+0.04 (0.02, 0.06)*	+0.02 (0.00, 0.04)*	+0.02 (0.00, 0.04)*	<0.0001
Manganese	0.86 (0.84, 0.87)	+0.03 (0.01, 0.05)*	+0.06 (0.03, 0.08)*	+0.03 (0.01, 0.05)*	<0.0001
Calcium	0.70 (0.67, 0.73)	-0.09 (-0.13, -0.04)*	-0.18 (-0.22, -0.14)*	-0.14 (-0.18, -0.10)*	<0.0001
Iron	0.58 (0.56, 0.61)	+0.04 (0.01, 0.08)*	+0.06 (0.02, 0.09)*	+0.02 (-0.01, 0.06)	0.0001
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	73.28 (72.25, 74.30)	-0.24 (-1.78, 1.29)	-0.56 (-2.09, 0.98)	-0.57 (-2.10, 0.97)	0.7231
Probabilities of adequacy for MS components (0-1)					
Carbohydrates	0.95 (0.94, 0.96)	0.00 (-0.01, 0.02)	-0.02 (-0.03, 0.00)*	-0.01 (-0.03, 0.00)	0.0004
Protein	0.95 (0.94, 0.96)	0.00 (-0.01, 0.02)	+0.01 (-0.01, 0.02)	+0.01 (-0.01, 0.02)	0.1906
Total fat	0.92 (0.91, 0.94)	0.00 (-0.02, 0.02)	0.00 (-0.01, 0.02)	-0.01 (-0.03, 0.01)	0.1757
SFA	0.30 (0.28, 0.33)	+0.05 (0.01, 0.08)*	+0.05 (0.01, 0.09)*	+0.03 (-0.01, 0.07)	0.0011
Sodium	0.58 (0.55, 0.61)	+0.01 (-0.04, 0.05)	+0.01 (-0.04, 0.05)	+0.01 (-0.03, 0.05)	0.9428
Sugars without lactose	0.71 (0.68, 0.74)	-0.06 (-0.1, -0.02)*	-0.09 (-0.13, -0.05)*	-0.06 (-0.10, -0.02)*	<0.0001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (n=2121) where only milk consumers were selected (n=837). ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; SFA, saturated fatty acids.
[2] Values are means with a 95% confidence interval.
[3] Values are differences of means between the simulated diet and the initial diet with a 95% confidence interval of the difference. * Mean of the simulated diet significantly different from the mean of the initial diet.
[4] P for ANOVA tests, post-hoc tests were performed after a Bonferroni correction for multiple comparisons.

Supplemental Table 8. PANDiet, AS, MS and probabilities of adequacies of the initial diet and differences observed in different scenarios of substitutions of dairy dessert items with dairy dessert substitutes according to the substitute's category in French adults (n=1666)[1].

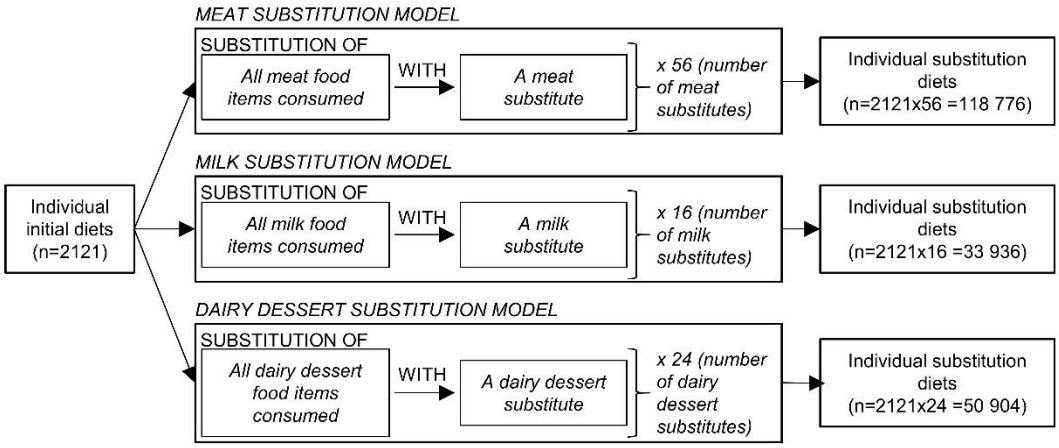
		DAIRY DESSERT SUBSTITUTION MODEL					
		Simulation of substitution of dairy dessert items with dairy dessert substitute according to the substitute's category[3]					
	Initial diet[2]	Plain plant-based desserts	Plain plant-based desserts, calcium fortified	Sweet plant-based desserts	Sweet plant-based desserts, calcium fortified	Plant-based mousses	P[4] (model)
PANDiet score (0-100)	68.48 (68.09, 68.88)	+0.93 (0.30, 1.55)*	+1.35 (0.73, 1.98)*	+0.20 (-0.43, 0.82)	+0.27 (-0.36, 0.89)	-2.85 (-3.48, -2.23)*	<0.0001
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	64.26 (63.39, 65.13)	+0.91 (-0.45, 2.27)	+1.77 (0.41, 3.14)*	+0.05 (-1.31, 1.41)	-0.05 (-1.41, 1.31)	-2.46 (-3.83, -1.10)*	<0.0001
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)							
Protein	0.85 (0.83, 0.87)	+0.01 (-0.01, 0.04)	+0.01 (-0.01, 0.04)	-0.02 (-0.04, 0.01)	-0.01 (-0.04, 0.01)	-0.07 (-0.10, -0.05)*	<0.0001
LA	0.43 (0.41, 0.45)	+0.22 (0.19, 0.25)*	+0.22 (0.19, 0.25)*	+0.14 (0.11, 0.17)*	+0.13 (0.11, 0.16)*	+0.22 (0.19, 0.25)*	<0.0001
ALA	0.11 (0.10, 0.13)	+0.06 (0.04, 0.09)*	+0.08 (0.06, 0.10)*	+0.02 (0.00, 0.04)	+0.03 (0.01, 0.05)*	-0.03 (-0.05, 0.00)*	<0.0001
DHA	0.23 (0.21, 0.25)	+0.01 (-0.03, 0.04)	+0.01 (-0.02, 0.04)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.02 (-0.05, 0.01)	0.0946
EPA+DHA	0.20 (0.18, 0.22)	+0.01 (-0.03, 0.04)	+0.01 (-0.03, 0.04)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.02 (-0.05, 0.01)	0.1279
Fiber	0.35 (0.33, 0.37)	+0.04 (0.00, 0.07)*	+0.07 (0.04, 0.11)*	+0.04 (0.01, 0.07)*	+0.03 (-0.01, 0.06)	+0.09 (0.06, 0.12)*	<0.0001
Vitamin A	0.50 (0.48, 0.53)	-0.02 (-0.05, 0.02)	-0.01 (-0.05, 0.02)	+0.01 (-0.02, 0.05)	-0.01 (-0.04, 0.03)	-0.09 (-0.12, -0.05)*	<0.0001
Thiamine	0.97 (0.97, 0.98)	0.00 (-0.01, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.00)	0.00 (-0.01, 0.00)	-0.01 (-0.01, 0.00)	-0.02 (-0.03, -0.01)*	<0.0001
Riboflavin	0.76 (0.74, 0.78)	-0.12 (-0.16, -0.09)*	-0.12 (-0.15, -0.09)*	-0.05 (-0.08, -0.02)*	-0.10 (-0.13, -0.07)*	-0.16 (-0.19, -0.13)*	<0.0001
Niacin	0.998 (0.997, 0.998)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	0.00 (0.00, 0.00)	-0.001 (-0.002, 0.00)*	<0.0001
Pantothenic acid	0.87 (0.86, 0.88)	-0.03 (-0.04, -0.01)*	-0.03 (-0.05, -0.01)*	-0.04 (-0.05, -0.02)*	-0.04 (-0.06, -0.02)*	-0.08 (-0.10, -0.07)*	<0.0001
Vitamin B-6	0.66 (0.64, 0.68)	+0.01 (-0.03, 0.04)	+0.02 (-0.02, 0.05)	-0.01 (-0.04, 0.02)	-0.01 (-0.04, 0.03)	-0.13 (-0.17, -0.10)*	<0.0001
Folate	0.66 (0.64, 0.68)	+0.03 (0.00, 0.07)*	+0.03 (0.00, 0.06)	-0.03 (-0.06, 0.01)	-0.01 (-0.05, 0.02)	-0.12 (-0.15, -0.09)*	<0.0001
Vitamin B-12	0.62 (0.60, 0.64)	-0.04 (-0.07, 0.00)*	-0.01 (-0.05, 0.02)	0.00 (-0.04, 0.03)	-0.03 (-0.06, 0.01)	-0.10 (-0.14, -0.07)*	<0.0001
Vitamin C	0.45 (0.43, 0.47)	+0.01 (-0.02, 0.05)	+0.02 (-0.02, 0.05)	0.00 (-0.04, 0.04)	0.00 (-0.04, 0.04)	-0.06 (-0.10, -0.03)*	<0.0001
Vitamin D	0.04 (0.03, 0.04)	-0.01 (-0.02, 0.00)	-0.01 (-0.01, 0.00)	-0.01 (-0.02, 0.00)*	-0.01 (-0.02, 0.00)	-0.01 (-0.02, 0.00)	0.0361
Vitamin E	0.82 (0.81, 0.83)	+0.06 (0.04, 0.07)*	+0.05 (0.04, 0.07)*	+0.02 (0.00, 0.04)*	+0.03 (0.01, 0.05)*	+0.04 (0.03, 0.06)*	<0.0001
Iodine	0.71 (0.69, 0.73)	-0.02 (-0.05, 0.01)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.02 (-0.05, 0.01)	-0.03 (-0.06, 0.00)*	-0.14 (-0.17, -0.11)*	<0.0001
Magnesium	0.87 (0.86, 0.88)	+0.02 (0.00, 0.03)	+0.02 (0.00, 0.03)*	+0.01 (0.00, 0.03)	+0.01 (-0.01, 0.02)	+0.03 (0.01, 0.04)*	<0.0001
Phosphorus	0.97 (0.97, 0.98)	0.00 (0.00, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.00)	0.00 (0.00, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.00)	0.00 (0.00, 0.01)	0.0036
Potassium	0.63 (0.61, 0.65)	-0.01 (-0.04, 0.02)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.01 (-0.05, 0.02)	-0.02 (-0.06, 0.01)	-0.06 (-0.09, -0.02)*	<0.0001
Selenium	0.94 (0.93, 0.95)	+0.01 (0.00, 0.02)	+0.01 (0.00, 0.03)*	+0.01 (0.00, 0.02)	+0.01 (0.00, 0.02)	-0.01 (-0.02, 0.00)	<0.0001
Zinc	0.31 (0.29, 0.33)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.01 (-0.04, 0.02)	-0.02 (-0.05, 0.01)	0.00 (-0.03, 0.03)	0.3129
Copper	0.87 (0.86, 0.87)	+0.03 (0.02, 0.04)*	+0.03 (0.02, 0.04)*	+0.03 (0.01, 0.04)*	+0.02 (0.00, 0.03)*	+0.05 (0.04, 0.06)*	<0.0001
Manganese	0.88 (0.87, 0.89)	+0.04 (0.02, 0.05)*	+0.04 (0.02, 0.05)*	+0.03 (0.01, 0.04)*	+0.03 (0.02, 0.05)*	+0.03 (0.01, 0.04)*	<0.0001
Calcium	0.63 (0.61, 0.66)	-0.11 (-0.14, -0.07)*	+0.01 (-0.02, 0.05)	-0.13 (-0.16, -0.09)*	-0.02 (-0.06, 0.01)	-0.18 (-0.21, -0.14)*	<0.0001
Iron	0.59 (0.58, 0.61)	+0.04 (0.01, 0.06)*	+0.03 (0.00, 0.05)*	+0.03 (0.01, 0.06)*	+0.02 (0.00, 0.05)	+0.18 (0.15, 0.21)*	<0.0001
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	72.71 (71.94, 73.48)	+0.94 (-0.26, 2.15)	+0.93 (-0.28, 2.14)	+0.34 (-0.87, 1.55)	+0.58 (-0.63, 1.79)	-3.24 (-4.45, -2.03)*	<0.0001
Probabilities of adequacy for MS components (0-1)							
Carbohydrates	0.95 (0.95, 0.96)	+0.01 (0.00, 0.02)	+0.01 (0.00, 0.02)	-0.01 (-0.02, 0.00)	-0.02 (-0.03, 0.00)*	+0.02 (0.01, 0.03)*	<0.0001
Protein	0.96 (0.95, 0.96)	-0.01 (-0.02, 0.01)	-0.01 (-0.02, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.02)	0.00 (-0.01, 0.01)	+0.01 (0.00, 0.03)*	<0.0001
Total fat	0.91 (0.90, 0.93)	-0.01 (-0.03, 0.01)	-0.01 (-0.03, 0.01)	0.00 (-0.01, 0.02)	+0.01 (-0.01, 0.03)	-0.09 (-0.11, -0.07)*	<0.0001
SFA	0.30 (0.28, 0.31)	+0.06 (0.03, 0.09)*	+0.06 (0.03, 0.09)*	+0.06 (0.03, 0.09)*	+0.09 (0.06, 0.12)*	-0.13 (-0.16, -0.10)*	<0.0001
Sodium	0.57 (0.55, 0.59)	-0.02 (-0.06, 0.01)	-0.02 (-0.06, 0.01)	+0.01 (-0.03, 0.04)	0.00 (-0.03, 0.03)	+0.08 (0.05, 0.12)*	<0.0001
Sugars without lactose	0.70 (0.68, 0.72)	+0.03 (0.00, 0.06)	+0.03 (0.00, 0.07)*	-0.04 (-0.08, -0.01)*	-0.05 (-0.08, -0.02)*	-0.10 (-0.14, -0.07)*	<0.0001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (n=2121) where only dairy dessert consumers were selected (n=1666). ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; SFA, saturated fatty acids.
[2] Values are means with a 95% confidence interval.
[3] Values are differences in means between the simulated diet and the initial diet with a 95% confidence interval of the difference. * Mean of the simulated diet significantly different from the mean of the initial diet.
[4] P for ANOVA tests, post-hoc tests were performed after a Bonferroni correction for multiple comparisons.

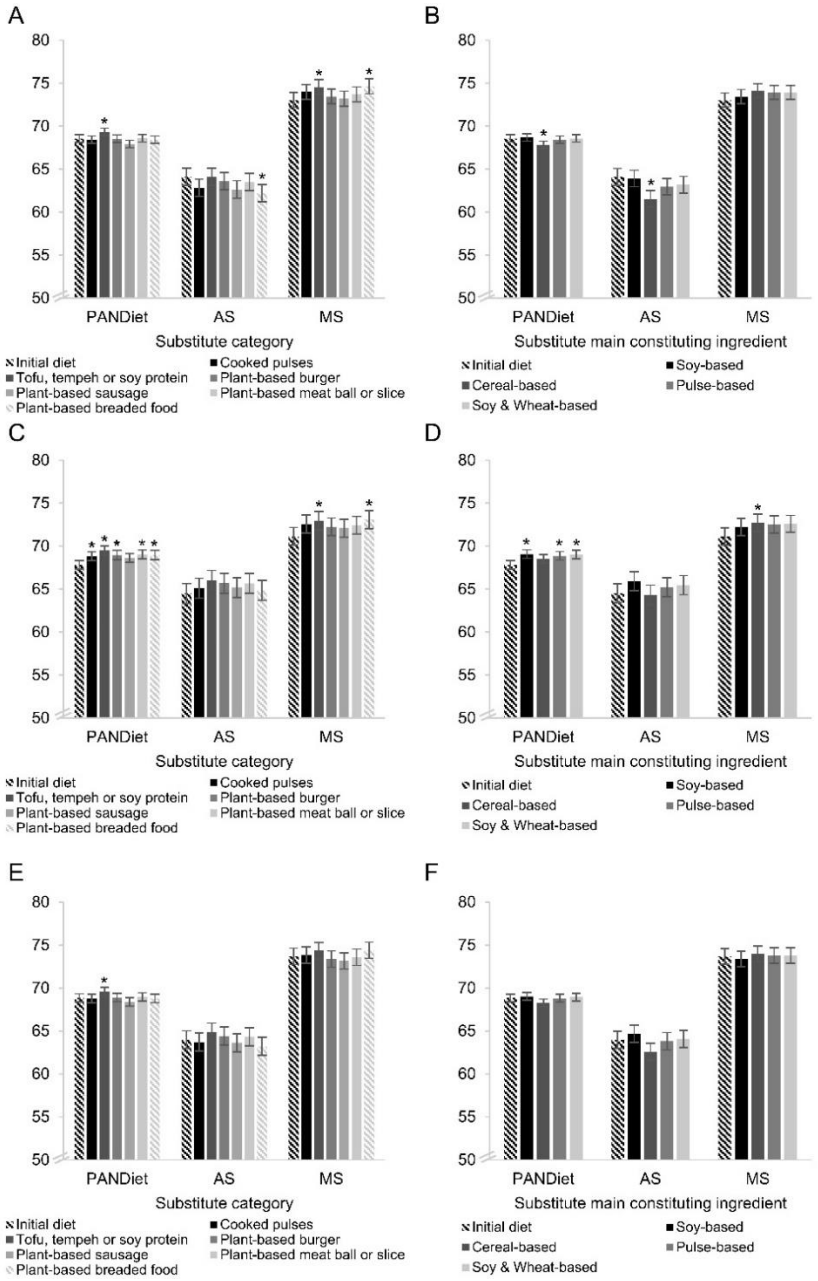
Supplemental Table 9. PANDiet, AS, MS and probabilities of adequacies of the initial diet and differences observed in different scenarios of substitutions of dairy dessert items with dairy dessert substitutes according to the substitute's main constituting ingredient in French adults (n=1666)[1].

DAIRY DESSERT SUBSTITUTION MODEL				
	Initial diet[2]	Simulation of substitution of dairy dessert items with dairy dessert substitute according to the substitute's main constituting ingredient[3]		P[4] (model)
		Soy-based substitutes	Non soy-based substitutes	
PANDiet score (0-100)	68.48 (68.13, 68.84)	+0.60 (0.10, 1.10)*	-1.31 (-1.80, -0.81)*	<0.0001
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	64.26 (63.47, 65.05)	+0.45 (-0.67, 1.56)	-1.25 (-2.36, -0.13)*	0.0008
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)				
Protein	0.85 (0.84, 0.87)	0.00 (-0.03, 0.02)	-0.05 (-0.07, -0.03)*	<0.0001
LA	0.43 (0.41, 0.45)	+0.16 (0.14, 0.19)*	+0.14 (0.12, 0.17)*	<0.0001
ALA	0.11 (0.10, 0.13)	+0.04 (0.02, 0.06)*	-0.01 (-0.03, 0.01)	<0.0001
DHA	0.23 (0.21, 0.25)	0.00 (-0.02, 0.03)	-0.01 (-0.03, 0.02)	0.6001
EPA+DHA	0.20 (0.18, 0.22)	0.00 (-0.02, 0.03)	-0.01 (-0.03, 0.02)	0.5777
Fiber	0.35 (0.33, 0.37)	+0.04 (0.01, 0.06)*	+0.07 (0.04, 0.09)*	<0.0001
Vitamin A	0.50 (0.48, 0.52)	+0.01 (-0.02, 0.04)	-0.06 (-0.09, -0.03)*	<0.0001
Thiamine	0.97 (0.97, 0.98)	0.00 (-0.01, 0.00)	-0.01 (-0.02, -0.01)*	<0.0001
Riboflavin	0.76 (0.74, 0.78)	-0.07 (-0.10, -0.05)*	-0.13 (-0.15, -0.10)*	<0.0001
Niacin	0.998 (0.997, 0.998)	0.00 (0.00, 0.00)	-0.001 (-0.002, 0.00)*	0.0457
Pantothenic acid	0.87 (0.86, 0.88)	-0.03 (-0.05, -0.02)*	-0.06 (-0.07, -0.05)*	<0.0001
Vitamin B-6	0.66 (0.64, 0.68)	0.00 (-0.02, 0.03)	-0.07 (-0.10, -0.04)*	<0.0001
Folate	0.66 (0.64, 0.68)	0.00 (-0.03, 0.03)	-0.08 (-0.11, -0.05)*	<0.0001
Vitamin B-12	0.62 (0.60, 0.64)	0.00 (-0.03, 0.02)	-0.08 (-0.11, -0.05)*	<0.0001
Vitamin C	0.45 (0.43, 0.47)	+0.01 (-0.03, 0.04)	-0.03 (-0.06, 0.00)	0.0232
Vitamin D	0.04 (0.03, 0.04)	-0.01 (-0.02, 0.00)*	-0.01 (-0.02, 0.00)*	0.0039
Vitamin E	0.82 (0.81, 0.83)	+0.03 (0.01, 0.04)*	+0.04 (0.03, 0.06)*	<0.0001
Iodine	0.71 (0.69, 0.73)	-0.04 (-0.06, -0.02)*	0.00 (-0.02, 0.02)	<0.0001
Magnesium	0.87 (0.86, 0.87)	+0.01 (0.00, 0.02)	+0.03 (0.01, 0.04)*	<0.0001
Phosphorus	0.97 (0.97, 0.98)	0.00 (0.00, 0.01)	0.00 (0.00, 0.01)	0.3282
Potassium	0.63 (0.61, 0.65)	-0.02 (-0.04, 0.01)	-0.03 (-0.05, 0.00)	0.0605
Selenium	0.94 (0.93, 0.95)	+0.01 (0.00, 0.02)	0.00 (-0.01, 0.01)	0.0523
Zinc	0.31 (0.29, 0.33)	-0.01 (-0.04, 0.01)	0.00 (-0.03, 0.02)	0.3888
Copper	0.87 (0.86, 0.87)	+0.02 (0.01, 0.03)*	+0.04 (0.02, 0.05)*	<0.0001
Manganese	0.88 (0.87, 0.89)	+0.03 (0.02, 0.04)*	+0.03 (0.02, 0.05)*	<0.0001
Calcium	0.63 (0.61, 0.65)	-0.06 (-0.09, -0.04)*	-0.14 (-0.17, -0.11)*	<0.0001
Iron	0.59 (0.58, 0.61)	+0.03 (0.00, 0.05)*	+0.09 (0.07, 0.11)*	<0.0001
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	72.71 (72.02, 73.40)	+0.75 (-0.23, 1.72)	-1.36 (-2.34, -0.39)*	<0.0001
Probabilities of adequacy for MS components (0-1)				
Carbohydrates	0.95 (0.95, 0.96)	-0.01 (-0.02, 0.00)*	0.00 (0.00, 0.01)	0.0007
Protein	0.96 (0.95, 0.96)	0.00 (-0.01, 0.01)	+0.01 (0.00, 0.02)	0.0246
Total fat	0.91 (0.90, 0.92)	+0.01 (-0.01, 0.02)	-0.04 (-0.05, -0.02)*	<0.0001
SFA	0.30 (0.28, 0.31)	+0.09 (0.06, 0.11)*	-0.05 (-0.07, -0.02)*	<0.0001
Sodium	0.57 (0.55, 0.59)	-0.01 (-0.03, 0.02)	+0.04 (0.01, 0.07)*	<0.0001
Sugars without lactose	0.70 (0.68, 0.72)	-0.03 (-0.06, -0.01)*	-0.05 (-0.08, -0.03)*	<0.0001

[1] Data from Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (n=2121) where only dairy dessert consumers were selected (n=1666). ALA, alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; SFA, saturated fatty acids.
[2] Values are means with a 95% confidence interval.
[3] Values are differences in means between the simulated diet and the initial diet with a 95% confidence interval of the difference. * Mean of the simulated diet significantly different from the mean of the initial diet.
[4] P for ANOVA tests, post-hoc tests were performed after a Bonferroni correction for multiple comparisons.



Supplemental Figure 1. Diagram describing the method for the substitution of animal products with plant-based substitutes.



Supplemental Figure 2. PANDiet scores, Adequacy Sub-scores (AS) and Moderation Sub-scores (MS) for the initial diet and substitution diets according to the substitute category or to the main constituting ingredient of the substitute in the three sub-models of meat substitution. (A, B) “Beef substitution model” (n=1371) simulated diets gathered by the substitute categories (A) or by the main constituting ingredient of substitutes (B); (C, D) “Pork substitution model” (n=933) simulated diets gathered by the substitute categories (C) or by the main constituting ingredient of substitutes (D); (E, F) “Poultry substitution model” (n=1144) simulated diets gathered by the substitute categories (E) or by the main constituting ingredient of substitutes (F); Values are means with 95% confidence intervals of the mean. * Significantly different from the initial diet, assessed by ANOVA and post-hoc tests with Bonferroni correction, at P<0.05. AS, Adequacy sub-score; MS, Moderation sub-score; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake.

Supplemental References

1. Monteiro CA, Cannon G, Levy R, Moubarac J-C, Jaime P, Martins AP, Canella D, Louzada M, Parra D. NOVA. The star shines bright. World Nutrition 2016;7:28–38.

2. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016 [Internet]. 2016. Available from: https://ciqual.anses.fr/

3. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2020 [Internet]. 2020. Available from: https://ciqual.anses.fr/

4. Etude NutriNet-Santé. Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database). Paris: Economica; 2013.

5. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, Paineau D, Huneau J-F. Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. Cameron DW, editor. PLoS ONE 2012;7:e42155.

6. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. Nutrients 2018;10:226.

7. Anses. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « Actualisation des références nutritionnelles françaises en vitamines et minéraux » ; saisine n°2018-SA-0238. Saisine liée n°2012-SA-0103. In press;

8. Committee to Review the Dietary Reference Intakes for Sodium and Potassium, Food and Nutrition Board, Health and Medicine Division, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Dietary Reference Intakes for Sodium and Potassium [Internet]. Stallings VA, Harrison M, Oria M, editors. Washington, D.C.: National Academies Press; 2019 [cited 2020 Dec 4]. Available from: https://www.nap.edu/catalog/25353

9. Scientific Opinion on Dietary Reference Values for zinc. EFSA Journal [Internet] [cited 2020 Dec 4]; Available from: https://data.europa.eu/doi/10.2903/j.efsa.2014.3844

10. Salomé M, Kesse-Guyot E, Fouillet H, Touvier M, Hercberg S, Huneau J-F, Mariotti F. Development and evaluation of a new dietary index assessing nutrient security by aggregating probabilistic estimates of the risk of nutrient deficiency in two French adult populations. Br J Nutr 2020;1–34.

11. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, editors. Vitamin and mineral requirements in human nutrition. 2nd ed. Geneva : Rome: World Health Organization ; FAO; 2004. 341 p.

12. EFSA (European Food Safety Agency). Dietary Reference Values for nutrients: Summary report. 2017;92.

13. Nordic Council of Ministers. Nordic Nutrition Recommendations 2012: Integrating nutrition and physical activity. Copenhagen: Nordic Council of Ministers; 2014.

14. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency, editors. Trace elements in human nutrition and health. Geneva: World Health Organization; 1996. 343 p.

15. Anses. Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. [Internet]. Maisons-Alfort, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).; 2016. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf

16. Otten JJ, Hellwig JP, Meyers LD, editors. DRI, dietary reference intakes: the essential guide to nutrient requirements. Washington, D.C: National Academies Press; 2006. 543 p.

17. Wang D, Chen X-H, Fu G, Gu L-Q, Zhu Q-T, Liu X-L, Qi J, Xiang J-P. Calcium intake and hip fracture risk: a meta-analysis of prospective cohort studies. Int J Clin Exp Med 2015;8:14424.

18. Bolland MJ, Leung W, Tai V, Bastin S, Gamble GD, Grey A, Reid IR. Calcium intake and risk of fracture: systematic review. BMJ 2015;h4580.

19. Bischoff-Ferrari HA, Dawson-Hughes B, Baron JA, Burckhardt P, Li R, Spiegelman D, Specker B, Orav JE, Wong JB, Staehelin HB, et al. Calcium intake and hip fracture risk in men and women: a meta- analysis of prospective cohort studies and randomized controlled trials. Am J Clin Nutr 2007;86:1780–90.

2.5. Article n°5 : Impacts de la substitution des produits animaux par des substituts végétaux sur le risque de carence et la mortalité par maladies non-transmissibles : une étude de simulation sur les adultes français (INCA3).

Cette partie présente les résultats préliminaires concernant l'étude de substitution simultanée de la viande, du lait et des desserts lactés par des substituts végétaux équivalents et les impacts sur la sécurité nutritionnelle et l'estimation du nombre de morts évitées par maladies chroniques. Ce travail est présenté ici comme un travail complémentaire à l'article n°4, et n'est pas destiné à être soumis en tant que tel. Des analyses complémentaires doivent être menées pour aboutir à un manuscrit destiné à être soumis pour publication.

Ce travail a été réalisé avec les contributions principales de Pascal Leroy, Jean-François Huneau et François Mariotti.

Résumé

Contexte : Les substituts à la viande et aux produits laitiers sont une alternative aux produits animaux pour les individus souhaitant en réduire la consommation. Cependant, l'impact de la consommation de ces produits sur la santé a été peu étudié.

Objectifs : Simuler des régimes de substitution complète de la viande, du lait et des desserts lactés par des substituts végétaux et évaluer les effets sur le risque de carence et la mortalité par maladies chroniques.

Méthode : A partir des consommations alimentaires observées de 2121 adultes (18-79 ans) de l'étude INCA3 (2014-2015), nous avons simulé des régimes où l'ensemble de la viande, du lait et des desserts lactés étaient remplacés par la même quantité d'un substitut végétal moyen de leur catégorie (substitut de viande, boisson végétale ou dessert végétal). Des substituts végétaux moyens de bonne, moyenne ou mauvaise qualité nutritionnelle ont été construits à partir des compositions nutritionnelles de 96 substituts végétaux et légumineuses. Pour analyser les effets, des scénarios intermédiaires ont été réalisés où seule la viande ou seuls les produits laitiers (ici lait & desserts lactés) étaient remplacés. Le risque carentiel a été évalué dans les régimes simulés par le système SecDiet. Le nombre de morts évitées ou ajoutées par les régimes simulés en comparaison au régime observé a été estimé en utilisant le modèle PRIME (Preventable Risk Integrated ModEl).

Résultats : Dans les régimes simulés, par rapport au régime observé, l'évaluation par le système du SecDiet ne montre pas d'augmentation globale du risque carentiel, mais une augmentation du risque de carence pour les vitamines B2 et B12, en raison de la substitution de la viande mais aussi des produits laitiers pour ce qui concerne la B2. L'usage de substituts de bonne qualité modère l'augmentation du risque pour la B2 mais pas pour la B12. La diminution de la consommation de viande rouge et de charcuterie, l'augmentation de la consommation de fibres et la modification des apports en acides gras permettraient d'éviter des morts par suite de cancers et diabète. Cependant, les substitutions de la viande conduisent à une augmentation de la consommation de sel, qui conduirait à une augmentation de la mortalité cardiovasculaire par

l'intermédiaire de la pression artérielle dans les scenarios de substitutions. La substitution de la viande et des produits laitiers permettrait d'éviter entre 3721 et 6671 morts.

Conclusion : Dans les régimes simulés, la substitution des produits animaux par des substituts végétaux tend à une légère augmentation du risque carentiel et à une diminution de la mortalité, dont l'effet est modéré par la quantité de sel des substituts de viande.

Messages clés

- La substitution des produits animaux par des substituts végétaux est associée à une faible élévation du risque de carence global lié à une augmentation du risque de carence pour les vitamines B2 et B12 et une diminution pour la vitamine B9.
- Substituer les produits animaux par des substituts végétaux permettrait d'éviter des morts associées à la consommation de viande rouge et charcuterie et à la consommation insuffisance de fibres.
- En revanche, la teneur en sodium des substituts de viande limite leurs bénéfices sur la mortalité évitée.
- Les substituts de meilleure qualité nutritionnelle permettent d'éviter le plus de morts prématurées et de limiter l'élévation du risque de carence.
- La substitution de la viande a des conséquences plus importantes que la substitution des produits laitiers sur la mortalité évitée ou ajoutée.
- La substitution des produits animaux entraîne à la fois une augmentation du pourcentage de protéines végétales (62% vs 33% initialement) et du pourcentage d'aliments ultra-transformés dans l'alimentation (41% vs 31% initialement).

Introduction

Le travail réalisé dans l'article n°4 a permis d'évaluer les impacts sur la qualité de l'alimentation de la substitution de la viande, du lait ou des desserts lactés par des substituts végétaux. Ces trois modèles de substitution (viande / lait / desserts lactés) ont été étudiés indépendamment. Par exemple, dans le scénario où la viande était remplacée par des substituts de viande, la consommation de lait et desserts lactés n'était pas modifiée.

Ce travail a montré que l'impact des substitutions sur l'adéquation nutritionnelle globale (selon le score PANDiet) était modéré mais présentait des hétérogénéités en fonction des probabilités d'adéquation des nutriments. Certaines probabilités d'adéquation étaient augmentées (par ex. fibres, acide linoléique, vitamine B9) quand d'autres diminuaient (i.e. vitamine B12, zinc et fer absorbés). Nous avons également constaté que lors de la substitution de la viande, la probabilité d'adéquation du fer diminuait et celle du calcium augmentait. A l'inverse, lors de la substitution du lait ou des desserts lactés, la probabilité d'adéquation du fer augmentait légèrement quand celle du calcium diminuait.

Ainsi, bien que ce travail montre les impacts spécifiques de la substitution d'une catégorie de produits, il n'évalue pas quels seraient les impacts de substituer à la fois la viande et les produits laitiers (hors fromage). Or, les individus réduisant ou excluant leur consommation de produits animaux, semblent à la fois consommer plus de substituts de viande et plus de substituts de produits laitiers que les individus non-végétariens (1–3).

De plus, dans l'article n°4 nous avons évalué les impacts des substitutions sur le PANDiet, qui est un indice pertinent pour comparer la qualité de l'alimentation des différents régimes simulés et observés, mais ne permet pas d'évaluer quelles pourraient être les répercussions d'un tel changement d'alimentation sur la santé de la population.

Ainsi, dans ce travail nous avons voulu étudier conjointement la substitution de la viande, du lait et des desserts lactés par les substituts végétaux équivalents et nous avons évalué les impacts sur le risque de carence (évalué avec le SecDiet) et sur l'estimation de la mortalité par maladies non-transmissibles.

Méthodes

Population étudiée et données de consommation

La population et les données de consommation sont les mêmes que dans l'article n°4. La population étudiée est celle de l'étude INCA3, menée en France métropolitaine en 2014-2015 (4,5). L'échantillon est représentatif de la population française et comporte 2121 adultes (887 hommes et 1234 femmes) âgés de 18 à 79 ans. Les données de consommation ont été récoltées par trois rappels de 24h non-consécutifs répartis sur trois semaines (4). La composition nutritionnelle des aliments provient de la table de composition nutritionnelle des aliments du CIQUAL (6).

Comme pour l'article n°4, nous avons identifié dans l'ensemble des aliments consommés par les participants à l'étude INCA3, ceux qui pourraient potentiellement être remplacés par des substituts

végétaux. Ainsi, on considère comme « substituable » un aliment qui, par l'usage, pourrait être remplacé par un substitut végétal. Dans le cas de la viande, cela représente les morceaux de viande usuellement consommés en plat principal (cela inclut notamment les saucisses, mais pas le saucisson par exemple). Dans le cas du lait, cela correspond aux différentes variétés de lait (de vache, de chèvre, entier, demi-écrémé, …) mais pas le lait en poudre ou le lait concentré. Dans le cas des desserts lactés, il s'agit de tous les yaourts et desserts lactés préparés (ex. crème dessert). Les aliments composés (pizzas, etc.) et la viande ou le lait présents dans les aliments composés n'ont pas été considérés comme substituables.

Scénarios de substitutions de la viande, du lait et des desserts lactés par des substituts végétaux équivalents

Alors que dans l'article n°4 nous avons voulu comparer les différents substituts végétaux entre eux, pour ce travail nous avons réduit le nombre de scénarios de substitutions en définissant des substituts végétaux moyens. La base de données de substituts végétaux est identique à celle de l'article n°4 et les compositions nutritionnelles proviennent des bases du CIQUAL version 2016 et 2020 et de la base de l'étude NutriNet-Santé (6–8).

Pour chaque catégorie (viande / lait / dessert lactés), nous avons créé un substitut « Moyen » ayant la composition nutritionnelle moyenne de l'ensemble des substituts de chaque catégorie (respectivement 43, 16 et 24 substituts de viande, lait et desserts lactés). Afin d'évaluer la variabilité entre les substituts, nous avons également créé un substitut « Moy-plus » comme étant, pour chaque catégorie, la composition nutritionnelle moyenne des 5 substituts entraînant le PANDiet le plus élevé lorsque ces substituts sont utilisés pour remplacer le produit animal considéré. De même, nous avons créé un substitut « Moy-moins » étant la moyenne des compositions nutritionnelles des 5 substituts entraînant dans chaque catégorie le moins bon PANDiet. Ces 5 « meilleurs » et « moins bons » substituts de chaque catégorie ont pu être identifiés grâce au travail réalisé dans l'article n°4. Finalement, dans le cas de la viande, un substitut moyen « Légumineuse » a également été créé à partir des compositions nutritionnelles de 13 légumineuses afin de comparer les légumineuses avec les substituts de viande (le substitut « Moyen » ne comprenant pas de légumineuses). La liste des substituts utilisés pour la création de chaque substitut moyen est présentée dans le Tableau supplémentaire 1.

Comme dans le cadre de l'article n°4, un scénario de substitution consistait à remplacer tous les aliments identifiés comme substituable par un substitut donné. Dans un premier temps, toute la viande, le lait et les desserts lactés consommés étaient substitués par le substitut moyen de leur catégorie (substitut de viande, boisson végétale, dessert végétal) pour chaque qualité de substitut moyen : « Moyen », « Moy-plus » ou « Moy-moins ». Ces scénarios sont identifiés par l'acronyme « VPL » (pour « Viande & produits laitiers ») suivi du nom du substitut moyen utilisé (Figure 1). Dans des scénarios intermédiaires, seule la viande a été remplacée (scénarios « V » pour « Viande ») soit par le substitut « Moyen », « Moy-plus », « Moy-moins » ou « Légumineuse » ou seuls le lait et les desserts lactés ont été remplacés (scénarios « PL » pour « Produits laitiers ») par leur substitut équivalent « Moyen », « Moy-plus » ou « Moy-moins ». Les aliments substitués étaient remplacés par la même quantité de substitut et la différence d'apport énergétique était rapporté sur le reste de l'alimentation (hors boisson). Ainsi, pour un individu donné, les régimes

simulés ont le même apport énergétique que les régimes observés. Dans la suite de ce travail, le terme « produits laitiers » représente le lait et les desserts lactés, mais exclut les fromages.

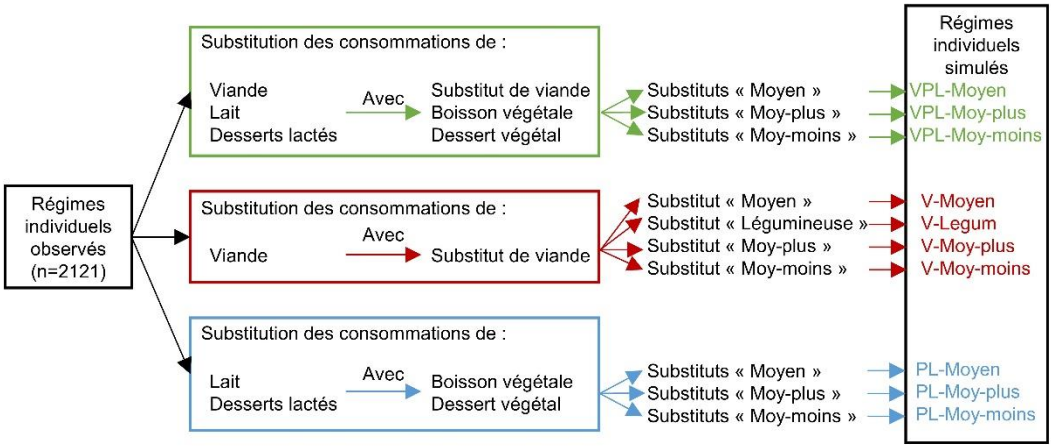


Figure 1. *Schéma des différents scénarios de substitution des produits animaux par des substituts végétaux et nomenclature des différents régimes simulés.*

<u>*Estimation de la sécurité nutritionnelle des apports*</u>

Nous avons calculé le score SecDiet tel que défini dans l'article n°3 (9). Ce score permet d'évaluer les probabilités d'avoir des apports supérieurs à un apport dit « carentiel » correspondant à un apport au-dessous duquel des signes cliniques de carence peuvent apparaître pour le nutriment considéré. Il comprend 12 nutriments : les vitamines A, B1, B2, B3, B9, B12 et C, le calcium, le fer, l'iode, le sélénium et le zinc. Le SecDiet permet une approche par nutriment et également d'avoir un score global d'estimation du risque de carence. Le SecDiet varie de 0 à 1 et plus le score est élevé, plus le risque de carence est faible.

<u>*Estimation de la mortalité*</u>

Afin d'évaluer quelles seraient les conséquences à long-terme d'une substitution des produits animaux par des substituts végétaux, nous avons estimé le nombre de morts par maladies chroniques évitées ou ajoutées associé à ces substitutions en utilisant le modèle PRIME (Preventable Risk Integrated ModEl) développé par Scarborough et al. (10) et mis à jour pour prendre en compte la consommation de viande rouge et charcuterie (11). Ce modèle d'évaluation comparative des risques permet d'évaluer les conséquences au niveau d'une population d'un changement d'alimentation, d'activité physique, de consommation d'alcool ou de tabac sur la mortalité par maladies non-transmissibles, soit directement, soit par l'intermédiaire de l'indice de poids corporel (IMC), du cholestérol sanguin ou de la pression artérielle (10).

Nous avons seulement considéré les paramètres liés à l'alimentation (fruits, légumes, fibres, sel, lipides, acides gras saturés, monoinsaturés, polyinsaturés, cholestérol alimentaire, viande rouge et charcuterie) et avons évalué les morts par maladies chroniques évitées ou ajoutées par les modifications induites dans les régimes simulés en comparaison avec le régime observé. Nous avons utilisé la distribution de la population par sexe et par tranches d'âge de 10 ans en 2014 fournie par l'INSEE (12) ainsi que les données de mortalité en 2014 provenant du Centre

d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (CépiDc) (13), afin d'avoir des données concordantes avec l'année de recueil des données de l'étude INCA3.

Analyses statistiques

Comme pour l'article n°4, nous avons estimé le pourcentage de protéines végétales et le pourcentage d'apport énergétique apporté par les aliments ultra-transformés (AUT) dans le régime observé et les régimes simulés. Une ANOVA associée à des tests post-hoc avec une correction de Bonferroni pour comparaisons multiples a été réalisée pour comparer les régimes simulés au régime observé. Pour le SecDiet et les probabilités associées, les analyses ont été menées avec un test non paramétrique de Kruskal-Wallis et des tests post-hoc de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner. Les 10 scénarios de régimes simulés ainsi que le régime observé étaient inclus dans le même modèle pour les ANOVA et les tests de Kruskal-Wallis. Les analyses ont été menées sur l'ensemble de la population puis sur les hommes et femmes séparément. Toutes les analyses ont été menée avec le logiciel SAS 9.4.

Résultats

La substitution de la viande et/ou des produits laitiers entraîne une augmentation de la part des protéines végétales dans l'alimentation qui passe de 33% dans le régime observé à 38-40% avec la substitution des produits laitiers, 51-55% avec la substitution de la viande et 61-63% avec la substitution de la viande et produits laitiers (Figure 2). La part des aliments ultra-transformés (AUT) dans l'apport énergétique augmente également sauf lorsque la viande est substituée par des légumineuses (Figure 2). On observe que les substituts de moins bonne qualité (« Moy-moins ») entraînent une plus forte augmentation du pourcentage d'AUT que les substituts de meilleure qualité (« Moy-plus »). Par exemple, pour la substitution de la viande et des produits laitiers (scénarios VPL), le pourcentage d'énergie apportée par les AUT atteint 46% (vs. 31% initialement) avec les substituts « Moy-moins » contre 41% avec les substituts « Moyen » et 36% avec les substituts « Moy-plus ».

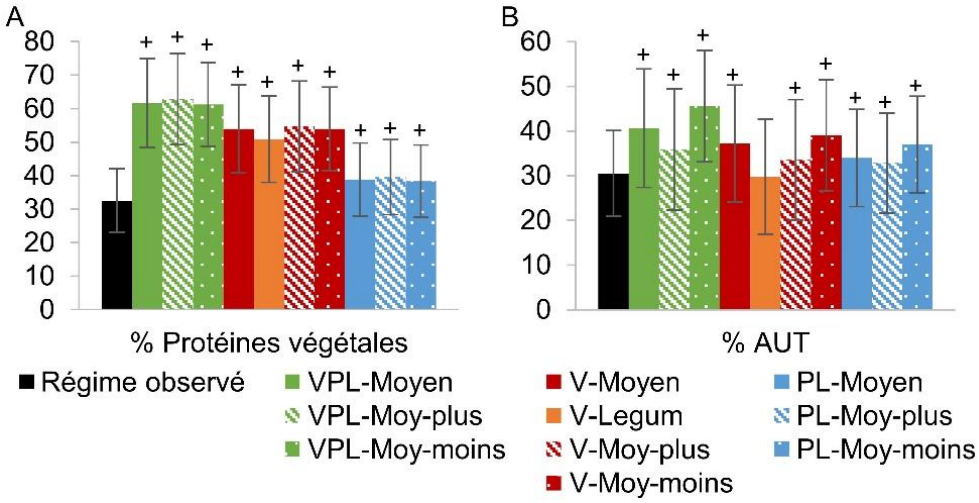


Figure 2. *A. Pourcentage de protéines végétales dans l'apport protéique en fonction des différents scénarios de substitutions. B. Pourcentage de l'apport énergétique apporté par les aliments ultra-*

transformés (AUT) en fonction des différents scénarios de substitutions. Les barres d'erreurs représentent l'écart-type. « + » indique que la moyenne est significativement supérieure (P<0,05) à celle du régime observé, évalué par une ANOVA avec une correction de Bonferroni pour comparaison multiple.

Évolution de la sécurité nutritionnelle

Le SecDiet et les probabilités d'avoir des apports suffisants pour éviter une carence pour chaque nutriment sont présentées Figure 3 pour quatre scénarios de substitution et dans le Tableau supplémentaire 2 pour l'ensemble des régimes simulés. Par rapport au régime observé (0,91 ± 0,11), le SecDiet diminue significativement, indiquant un risque de carence plus élevé, uniquement pour les scénarios « VPL-Moy-moins » (0,87 ± 0,13) et « PL-Moy-moins » (0,88 ± 0,12).

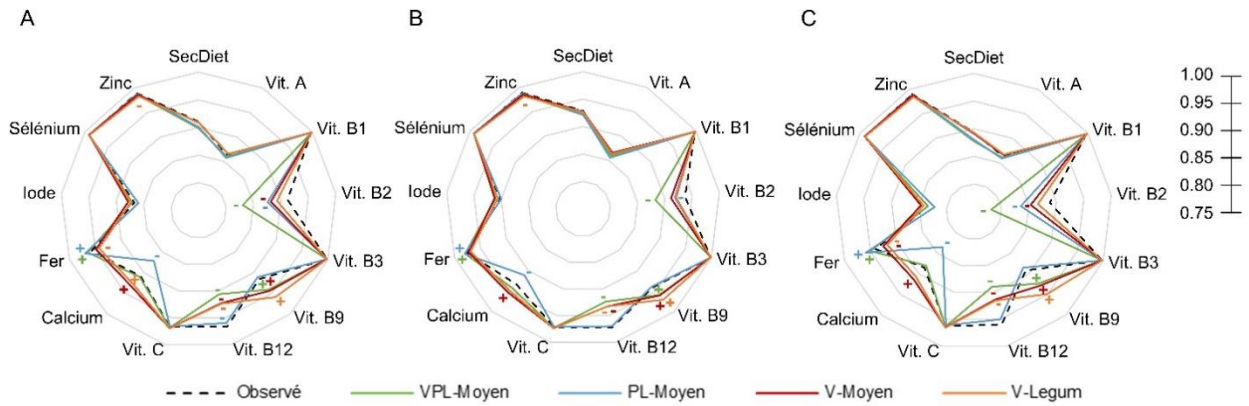


Figure 3. *Score SecDiet et probabilités associées pour chaque nutriment dans le régime observé et 4 scénarios de substitutions (« VPL-Moyen », « PL-Moyen », « V-Moyen », « V-Legum »). A. Ensemble de la population. B. Hommes. C. Femmes. +/- significativement supérieur/inférieur au régime observé, estimé par des tests de Kruskal-Wallis et de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner.*

De manière générale, les probabilités diminuent pour les vitamines B2 et B12 et augmentent pour la vitamine B9. Les probabilités pour le fer augmentent dans les scénarios « VPL » et « PL » mais diminuent pour les scénarios « V » alors que les probabilités pour le calcium augmentent pour les scénarios « V » et diminuent pour les scénarios « PL ». La probabilité du zinc diminue légèrement dans le scénario « V-Legum » (0,98 ± 0,06 vs 0,99 ± 0,04) et augmente pour le scénario « V-Moy-plus ». La probabilité de l'iode augmente dans les scénarios « VPL » et « PL » avec les substituts « Moy-plus » mais diminue avec les substituts « Moy-moins ».

Les évolutions sont similaires chez les hommes et les femmes mais le SecDiet est initialement plus bas chez les femmes que chez les hommes (0,89 ± 0,11 vs. 0,93 ± 0,10), de même que certaines probabilités (notamment vitamines B2, B9, calcium, fer et iode). Les diminutions des probabilités sont généralement plus importantes chez les femmes que chez les hommes.

Estimation des morts par maladies chroniques évitées

Parmi les facteurs alimentaires pris en compte dans le modèle PRIME (Tableau supplémentaire 3), on constate que dans la majorité des régimes simulés, il y a une augmentation de la quantité

de fibres et d'acides gras polyinsaturés et une diminution des acides gras saturés et du cholestérol alimentaire. Pour les scénarios « VPL » et « V » il y a également une diminution de la viande rouge et de la charcuterie et une augmentation dans certains scénarios de la quantité de sel (par exemple 9,6g de sel dans le régime « VPL-Moyen » contre 9,0 dans le régime observé pour les hommes). La quantité de fruits et légumes varie peu.

La Figure 4 montre les morts évitées en fonction des différents facteurs alimentaires (Figure 4.A) et des maladies (Figure 4.B). Dans l'ensemble des scénarios « VPL » et « V », on estime que la diminution de la consommation de viande rouge et charcuterie permettrait d'éviter ≈ 2900 morts et l'augmentation de la consommation de fibres permettrait d'éviter ≈ 1800 morts. Le changement de cholestérol sanguin (associé aux modifications d'apports en acides gras) permettrait d'éviter ≈ 900 morts. Cependant, le changement de pression artérielle, par le biais de la consommation de sel, entraînerait entre 9 (scénario « V-Moy-plus ») et 1132 (scénario « V-Moy-moins ») morts supplémentaires. Au total, dans les scénarios « VPL », le nombre de morts évités par maladies chroniques serait le plus important avec le substitut « VPL-Moy-plus » (6671 morts évitées soit 4,8% de la mortalité par maladies non-transmissibles dans la population française) et le plus faible avec le substitut « VPL-Moy-moins » (3721 morts évitées). Dans les scénarios « V », la substitution avec les légumineuses permettrait d'éviter le plus de morts (6450 morts évitées) alors que la substitution avec le substitut « V-Moy-moins » aurait l'impact le plus faible (3072 morts évitées). Dans les scénarios « VPL » et « V », le nombre de morts évitées par cancer et diabète de type 2 est relativement stable entre les différents scénarios (respectivement ≈2100 et ≈1100 morts évitées) alors que les variations sont plus importantes pour la mortalité évitée par maladies cardiovasculaires (entre 15 et 3448 morts évitées). Concernant les scénarios de substitution des produits laitiers, le nombre de morts évitées est moins important (≈1100 morts évitées) et s'explique majoritairement par une consommation plus importante de fibres. Lorsque l'on regarde le détail par classe d'âge (Tableau supplémentaire 4), on constate que le pourcentage de morts évitées est le plus important pour les classes d'âge 35-44 ans et 45-54 ans.

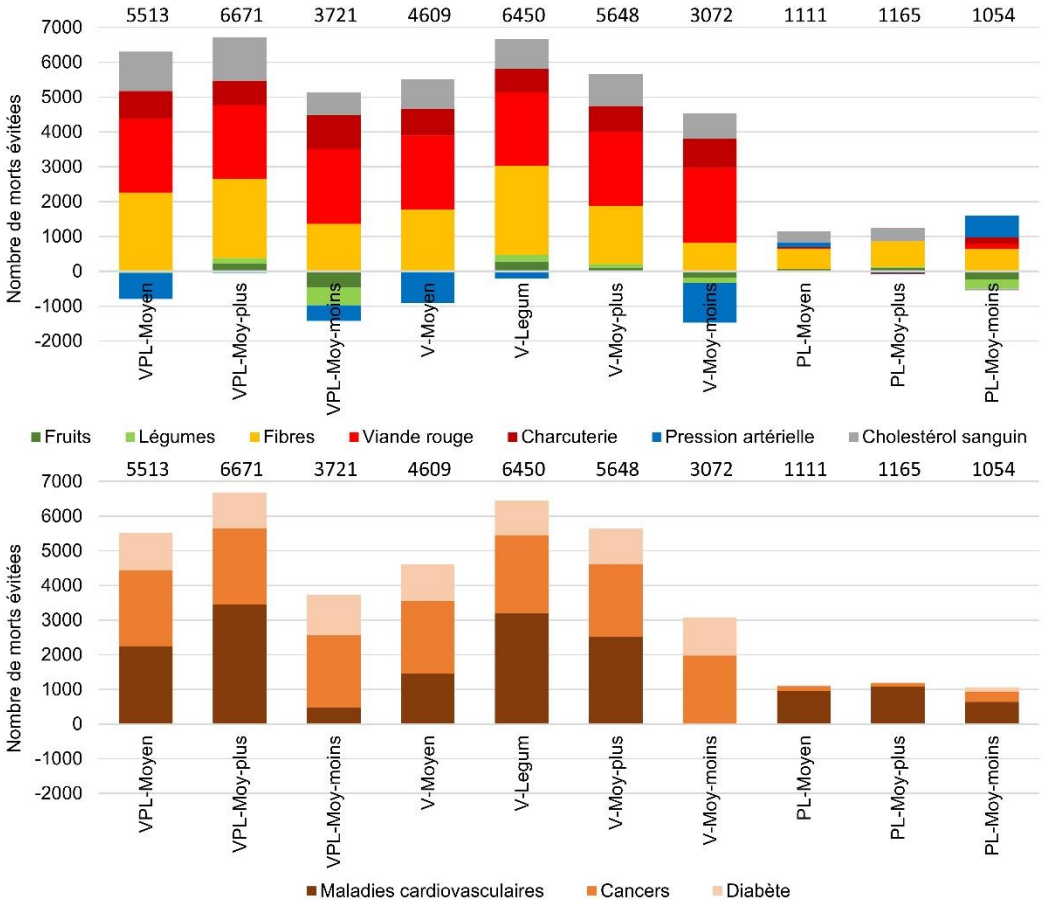


Figure 4. *Estimation des morts par maladies chroniques évitées avec le modèle PRIME. A. Morts évitées en fonction des différents facteurs alimentaires. Le changement de pression artérielle est estimé par le biais de la consommation de sel et le cholestérol sanguin par le biais de la consommation de lipides (totaux, saturés, monoinsaturés, polyinsaturés) et de cholestérol alimentaire. B. Morts évitées en fonction des maladies incluses dans le modèle PRIME. Les données sont la somme des morts évitées estimées par sexe et par classe d'âge de 10 ans.*

Discussion

Dans cette étude, nous avons simulé des substitutions de produits animaux (viande, lait, desserts lactés) par des substituts végétaux dans le régime alimentaire des adultes français. Nous avons vu que ces substitutions entraîneraient une augmentation du risque de carence pour certains nutriments et une réduction de la mortalité par maladies non-transmissibles.

Dans notre étude, le SecDiet ne diminue pas dans le scenario de substitution total moyen. Au niveau des risques concernant les nutriments individuellement, ce scenario conduit à une augmentation du risque carentiel pour les vitamines B2 et B12 et une diminution du risque pour la B9. L'augmentation du risque concernant la B2 s'explique par des effets cumulatifs assez similaires de la substitution de la viande et des produits laitiers, tandis que l'augmentation du risque pour la vitamine B12 et sa diminution pour la B9 est essentiellement dû à la substitution de

la viande. Ces résultats rappellent l'importance de la viande dans l'apport en B12 tout en soulignant l'absence de B12 dans les substituts de viande, qui contribuent à l'inverse à l'apport en B9. La complémentation en vitamine B12 est fortement recommandée pour les individus suivant des régimes végétaliens, en prévention de la carence et moins souvent pour des régimes végétariens, en prévention de l'augmentation de l'homocystéinémie (14,15). Nos résultats suggèrent que la substitution de viande sans enrichissement ou supplémentation en vitamine B12 pourrait augmenter le risque carentiel (représenté par l'anémie mégaloblastique) et un enrichissement des substituts de viande pourrait être envisagé. Pour la vitamine B2, nous trouvons un effet cumulatif car la viande et les produits laitiers sont des contributeurs importants aux apports (environ 30% des apports pour les adultes de l'étude INCA3 (5)). Ainsi, la consommation de produits végétaux contenant de la vitamine B2 devrait être encouragée lors de la réduction de consommation de produits animaux. On constate notamment que la diminution de la probabilité d'adéquation est nettement moins importante avec les substituts de meilleure qualité que ceux de moins bonne qualité. Nos résultats pourraient aussi justifier un enrichissement des substituts végétaux.

Le risque carentiel concernant le calcium ne varie pas dans le scenario total moyen, car la diminution des apports en calcium par la substitution des produits laitiers est compensée par les teneurs plus importantes dans les substituts qui remplacent la viande. On note que les substituts de produits laitiers ont des teneurs en calcium très variables, si bien que la substitution des produits laitiers par des substituts de bonne qualité, enrichis en calcium, entraine une dégradation moins importante de l'apport en calcium. Dans l'article n°4, nous avions montré que les boissons et desserts végétaux enrichis en calcium permettaient de maintenir des apports calciques satisfaisant (16). Dans ce travail, nous relevons donc qu'en fin de compte, dans les scénarios complets avec des substituts de bonne qualité, la substitution conduit à une diminution du risque carentiel en calcium. Concernant le fer, nous constatons que le risque carentiel évolue peu dans le scénario total. Le risque diminue avec la substitution des produits laitiers, ce qui pourrait s'expliquer par une quantité de fer plus importante dans les substituts que dans les produits laitiers (8,17) et par une diminution des apports en calcium qui permettrait une meilleure absorption du fer (le calcium étant un inhibiteur de l'absorption du fer non-héminique (18)). En revanche, le risque carentiel augmente lors de la substitution de la viande avec des légumineuses ou avec le substitut moyen de moins bonne qualité nutritionnelle, mais pas avec les autres substituts.

Un autre objectif de cette étude était d'évaluer à l'aide d'un modèle d'évaluation comparative du risque quelle pourrait être l'évolution de la mortalité par maladies non-transmissibles associée à une substitution des produits animaux par des substituts végétaux.

Dans le scénario total moyen, nous avons constaté une diminution globale du risque de mortalité de 5513 morts par an. La diminution de la consommation de viande rouge et de charcuterie, l'augmentation de la consommation de fibres et un changement dans les apports en acides gras (moins d'acides gras saturés et plus d'acides gras polyinsaturés) permettraient d'éviter des morts prématurées. Mais, d'autre part, les substitutions de la viande conduisent à une augmentation de la consommation de sel, qui entraînerait des morts supplémentaires, par l'intermédiaire de la pression artérielle. L'augmentation de la pression artérielle est en effet associée à une augmentation de la mortalité par maladies cardiovasculaires (10). On remarque d'ailleurs dans nos résultats que les morts évitées par cancers et diabètes sont relativement similaires en fonction

des substituts, alors que le nombre de morts évitées par maladies cardiovasculaires est beaucoup plus variable en fonction des substituts de viande utilisés. Ainsi, on peut suggérer que la teneur en sel des substituts de viande modèrerait les effets bénéfiques sur la mortalité cardiovasculaire des autres changements alimentaires associés aux substitutions. Cependant les teneurs en sel sont variables entre les substituts de viande et les scénarios impliquant de meilleurs substituts entraînent moins de morts ajoutées associées au changement de pression artérielle que les scénarios impliquant de moins bons substituts. En effet, les substituts « Moyen » et « Moy-plus » contenaient respectivement environ 500 et 600 mg/100g de sodium alors que les substituts « Moy-plus » et « Légumineuse » contenaient un peu plus de 100 mg/100g de sodium. L'OMS a récemment publié des quantités maximales de références pour les teneurs en sodium dans différents produits alimentaires pour lutter contre la consommation excessive de sel (19). Pour les substituts de viande, l'OMS a fixé comme cible moins de 250 mg de sodium pour 100 g de produit (19).

Une des limites de notre analyse est que nous n'avons pas tenu compte de l'ajout de sel au moment de la préparation ou de la consommation de la viande. Les simulations ont consisté à remplacer la viande par des substituts, sans tenir compte de modification probable du sel ajouté. En effet, les substituts de viande étant des aliments transformés, le sel est plus souvent pré-incorporé à la recette, au contraire de la viande quand elle se présente sous forme brute ou peu transformée. L'évaluation de la consommation de sel est toujours extrêmement imprécise dans les enquêtes alimentaires, en raison de la difficulté à quantifier le sel ajouté au moment de la préparation ou de la consommation. Nous n'avons donc pas pu considérer un ajout moyen de sel à la viande. Néanmoins, nos résultats montrent que le changement de pression artérielle est un facteur non négligeable dans l'estimation de la mortalité par maladies cardiovasculaires lors de la substitution de la viande par des substituts de viande et il paraît alors tout à fait pertinent de réduire au maximum la teneur en sodium dans ces produits.

Afin d'éviter des biais liés au changement d'apport énergétique dans l'estimation de la mortalité, nous avons mené des substitutions iso-énergétiques. Comme les produits animaux étaient remplacés par la même quantité de substituts végétaux, nous avons rapporté la différence d'énergie sur le reste de l'alimentation. Bien que cette méthode nous permette de s'affranchir des effets de l'apport énergétique, cet ajustement a pu influencer les résultats par l'intermédiaire des autres facteurs alimentaires inclus dans le modèle PRIME. Notamment, les substituts « Moyen-moins » étant plus énergétiques que les substituts « Moyen-plus », il était forcément nécessaire de plus diminuer la consommation du reste de l'alimentation avec les substituts de moins bonne qualité que ceux de meilleure qualité. Pour s'affranchir de cet effet, on aurait pu choisir de substituer les produits animaux par un apport calorique équivalent de substitut végétal. Cependant, nous avons fait le choix de substituer les produits animaux par la même quantité de substituts végétaux car ces produits sont destinés à avoir le même usage et des tailles de portions similaires (par exemple, un pot de yaourt et un pot de dessert végétal font le même poids). La compensation énergétique par le reste de l'alimentation, sous-tendue par les scenarios à iso-énergie, reste encore le scenario simple qui est le plus réaliste. On peut néanmoins signaler que la compensation énergétique n'est certainement pas totale et que donc nous avons pu sous-estimer les effets santé de substituts végétaux qui sont moins dense énergétiquement.

Les estimations de morts évitées restent cependant faibles au regard d'autres études ayant utilisé le modèle PRIME ou des versions antérieures et qui ont montré que suivre les repères de consommations alimentaires pourrait éviter 14% des morts en Suède (20) et au Royaume-Uni (21) et 36% au Canada (22). Cependant, dans ces études, une grande partie des morts évitées s'expliquait par une consommation plus importante de fruits et légumes, hors ces deux facteurs ont peu évolué dans nos scénarios de substitutions. Les modifications des régimes considérés dans ces études sont très larges, correspondant à l'adoption de régimes alimentaires beaucoup plus distants de l'observé que ce que nous avons simulé ici.

Finalement, nous avons également montré que remplacer les produits animaux par des substituts végétaux pourrait augmenter la contribution énergétique des aliments ultra-transformés (jusqu'à 46% de l'apport énergétique total). Or les données récentes suggèrent qu'une consommation plus importante d'aliments ultra-transformés pourrait augmenter l'incidence et la mortalité de certaines maladies non-transmissibles (23–25). Cependant ces données ne sont pas prises en compte dans les modèles d'évaluations comparatives des risques et ce résultat seul ne permet pas de prédire un risque plus élevé de morbidité ou mortalité, d'autant plus que les substituts végétaux permettent de contribuer aux apports en fibres et pourraient réduire la mortalité.

Cette étude nous a permis d'évaluer les conséquences sur différents indicateurs nutritionnels et de santé de la substitution de produits animaux par des substituts végétaux. Cependant, on pourrait considérer que les régimes simulés ne sont pas entièrement réalistes. Tout d'abord, nous avons seulement remplacé les produits animaux par des substituts végétaux sans considérer de possibles réarrangement dans la consommation d'autres groupes alimentaires (hors ajustement énergétique). Cependant, lorsque l'on compare la consommation des individus végétariens ou semi-végétariens et non-végétariens, les différences de consommation ne concernent pas uniquement les groupes d'aliments protéiques mais également les autres groupes alimentaires, avec une consommation plus importante de fruits, légumes, céréales complètes et plus faible de produits sucrés et de boissons alcoolisées (2). De plus, nous avons étudié un scénario où l'ensemble de la viande, du lait et des desserts lactés consommés étaient remplacés par des substituts végétaux alors qu'il serait peut-être plus probable que les consommateurs souhaitant végétaliser leur alimentation ne remplacent qu'une partie de leur consommation de produits animaux et ne les remplacent pas uniquement par des substituts végétaux. Néanmoins, cette étude nous a permis d'étudier spécifiquement l'impact de la substitution des produits animaux par des substituts végétaux.

En conclusion, nous avons évalué que remplacer une grande partie des produits animaux par des substituts végétaux aurait un impact limité sur le risque de carence, avec toutefois un risque plus élevé pour les vitamines B2 et B12. D'après l'évaluation comparative du risque de mortalité, la substitution des produits animaux, et plus particulièrement la viande, par des substituts végétaux permettraient de réduire la mortalité par maladie non-transmissibles, mais les bénéfices sur la mortalité par maladies cardiovasculaires semblent limités par les teneurs en sodium des substituts de viande. Nous avons cependant vu qu'il y avait des différences en fonction de la qualité des substituts végétaux et que les substituts de meilleure qualité permettaient de limiter le risque de carence tout en réduisant le plus la mortalité. Pour garantir des apports nutritionnels adéquats, il semble alors nécessaire de concevoir des substituts végétaux de bonne qualité nutritionnelle avec

de faible teneur en sodium, mais également de ne pas considérer uniquement la substitution des produits animaux et étudier la pertinence d’autres changements de consommation alimentaire.

Références

1. Allès B, Baudry J, Méjean C, Touvier M, Péneau S, Hercberg S, Kesse-Guyot E. Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Santé Study. Nutrients 2017;9:1023.

2. Kathryn Bradbury, Tammy Tong, Timothy Key. Dietary Intake of High-Protein Foods and Other Major Foods in Meat-Eaters, Poultry-Eaters, Fish-Eaters, Vegetarians, and Vegans in UK Biobank. Nutrients 2017;9:1317.

3. Orlich MJ, Jaceldo-Siegl K, Sabaté J, Fan J, Singh PN, Fraser GE. Patterns of food consumption among vegetarians and non-vegetarians. Br J Nutr 2014;112:1644–53.

4. Dubuisson C, Dufour A, Carrillo S, Drouillet-Pinard P, Havard S, Volatier J-L. The Third French Individual and National Food Consumption (INCA3) Survey 2014–2015: method, design and participation rate in the framework of a European harmonization process. Public Health Nutr 2019;22:584–600.

5. Anses. Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA3) [Internet]. Maisons-Alfort: Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail; 2017. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf

6. Anses. Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual. Version 2016 [Internet]. 2016. Available from: https://ciqual.anses.fr/

7. Etude NutriNet-Santé. Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database). Paris: Economica; 2013.

8. Anses. Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual. Version 2020 [Internet]. 2020. Available from: https://ciqual.anses.fr/

9. Salomé M, Kesse-Guyot E, Fouillet H, Touvier M, Hercberg S, Huneau J-F, Mariotti F. Development and evaluation of a new dietary index assessing nutrient security by aggregating probabilistic estimates of the risk of nutrient deficiency in two French adult populations. Br J Nutr 2020;1–34.

10. Scarborough P, Harrington RA, Mizdrak A, Zhou LM, Doherty A. The Preventable Risk Integrated ModEl and Its Use to Estimate the Health Impact of Public Health Policy Scenarios. Scientifica 2014;2014:1–21.

11. Briggs ADM, Cobiac LJ, Wolstenholme J, Scarborough P. PRIMEtime CE: a multistate life table model for estimating the cost-effectiveness of interventions affecting diet and physical activity. BMC Health Serv Res 2019;19:485.

12. Insee. La situation démographique en 2014. Etat civil et estimations de population - Insee Résultats. [Internet]. 2016 [cited 2021 Jun 1]. Available from: https://www.insee.fr/fr/statistiques/2045377?sommaire=2045470

13. Inserm CépiDC. Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès [Internet]. Available from: https://www.cepidc.inserm.fr/

14. Melina V, Craig W, Levin S. Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Vegetarian Diets. Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics 2016;116:1970–80.

15. Rizzo G, Laganà A, Rapisarda A, La Ferrera G, Buscema M, Rossetti P, Nigro A, Muscia V, Valenti G, Sapia F, et al. Vitamin B12 among Vegetarians: Status, Assessment and Supplementation. Nutrients 2016;8:767.

16. Salomé M, Huneau J-F, Le Baron C, Kesse-Guyot E, Fouillet H, Mariotti F. Substituting Meat or Dairy Products with Plant-Based Substitutes Has Small and Heterogeneous Effects on Diet Quality and Nutrient Security: A Simulation Study in French Adults (INCA3). J Nutr 2021;nxab146.

17. Vanga SK, Raghavan V. How well do plant based alternatives fare nutritionally compared to cow's milk? J Food Sci Technol 2018;55:10–20.

18. Armah SM, Carriquiry A, Sullivan D, Cook JD, Reddy MB. A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults. J Nutr 2013;143:1136–40.

19. WHO. WHO global sodium benchmarks for different food categories. Geneva: World Health Organization; 2021.

20. Saha S, Nordstrom J, Gerdtham U-G, Mattisson I, Nilsson P, Scarborough P. Prevention of Cardiovascular Disease and Cancer Mortality by Achieving Healthy Dietary Goals for the Swedish Population: A Macro-Simulation Modelling Study. IJERPH 2019;16:890.

21. Scarborough P, Nnoaham KE, Clarke D, Capewell S, Rayner M. Modelling the impact of a healthy diet on cardiovascular disease and cancer mortality. J Epidemiol Community Health 2012;66:420–6.

22. Bélanger M, Poirier M, Jbilou J, Scarborough P. Modelling the impact of compliance with dietary recommendations on cancer and cardiovascular disease mortality in Canada. Public Health 2014;128:222–30.

23. Monteiro C, Cannon G, Lawrence M, Costa Louzada M, Pereira Machado P. Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system. Rome: FAO; 2019.

24. Blanco-Rojo R, Sandoval-Insausti H, López-Garcia E, Graciani A, Ordovás JM, Banegas JR, Rodríguez-Artalejo F, Guallar-Castillón P. Consumption of Ultra-Processed Foods and Mortality: A National Prospective Cohort in Spain. Mayo Clinic Proceedings 2019;94:2178–88.

25. Chen X, Zhang Z, Yang H, Qiu P, Wang H, Wang F, Zhao Q, Fang J, Nie J. Consumption of ultra-processed foods and health outcomes: a systematic review of epidemiological studies. Nutr J 2020;19:86.

Tableau supplémentaire 1. Liste des substituts végétaux utilisés pour définir les substituts moyens « Moyen », « Légumineuse », « Moy-plus », « Moy-moins ».

Catégorie de substitut	Intitulé du substitut	Base de données d'origine	Substitut « Moyen »	Substitut « Légumi-neuse »	Substitut « Moy-plus »	Substitut « Moy-moins »
Boissons végétales	Boisson (lait) au soja	(1)	×		×	
	Boisson (lait) au soja aromatisée et enrichie en calcium	(1)	×		×	
	Boisson (lait) au soja enrichie en calcium	(1)	×		×	
	Boisson au soja, nature	(2)	×		×	
	Boisson au soja, nature, enrichie en calcium	(2)	×		×	
	Boisson (lait) à la châtaigne	(1)	×			×
	Boisson (lait) à l'épeautre	(1)	×			×
	Boisson (lait) de riz	(1)	×			×
	Boisson à la châtaigne, nature, préemballée	(3)	×			×
	Boisson à la noix de coco, nature, préemballée	(3)	×			×
	Boisson (lait) à l'amande	(1)	×			
	Boisson (lait) à l'avoine	(1)	×			
	Boisson à l'amande, nature, non sucrée, non enrichie, préemballée	(3)	×			
	Boisson à l'amande, sucrée, enrichie en calcium, préemballée	(3)	×			
	Boisson à l'amande	(2)	×			
	Boisson au soja, aromatisée, sucrée	(2)	×			
Desserts végétaux	Crème dessert au soja aromatisée #1	(1)	×		×	
	Crème dessert au soja aux fruits #1	(1)	×		×	
	Dessert au soja, nature, non sucré, enrichi en calcium, fermenté, préemballé	(3)	×		×	
	Dessert au soja, nature, rayon frais	(2)	×		×	
	Yaourt au lait végétal	(1)	×		×	
	Crème dessert végétale (sans soja)	(1)	×			×
	Dessert végétal sans soja (amande, avoine, chanvre, coco, riz), aromatisé, sucré, non enrichi, préemballé	(3)	×			×
	Dessert végétal sans soja (coco, riz), aux fruits, sucré, enrichi en calcium, fermenté, préemballé	(3)	×			×
	Mousse au chocolat végétale (au soja)	(1)	×			×
	Mousse au chocolat végétale, préemballée	(3)	×			×
	Crème dessert au soja aromatisée #2	(1)	×			
	Crème dessert au soja aromatisée #3	(1)	×			
	Crème dessert au soja aromatisée #4	(1)	×			
	Crème dessert au soja aux fruits #2	(1)	×			
	Crème dessert au soja aux fruits #3	(1)	×			
	Dessert au soja aromatisé. rayon frais	(2)	×			
	Dessert au soja, aromatisé, sucré, enrichi en calcium, préemballé	(3)	×			
	Dessert au soja, aromatisé, sucré, non enrichi, préemballé	(3)	×			
	Dessert au soja, aux fruits, sucré, enrichi en calcium, fermenté, préemballé	(3)	×			
	Dessert au soja, aux fruits, sucré, non enrichi, fermenté, préemballé	(3)	×			
	Dessert au soja, nature, non sucré, non enrichi, fermenté, préemballé	(3)	×			
	Dessert au soja, aux fruits, rayon frais	(2)	×			
	Yaourt au soja aux fruits	(1)	×			
	Yaourt au soja nature	(1)	×			
Substitut de viande	Protéine de soja texturée, réhydratée	(2)	×		×	
	Steak de soja au curry #1	(1)	×		×	
	Steak de soja aux fines herbes #1	(1)	×		×	
	Tempeh	(3)	×		×	
	Tofu nature, préemballé	(3)	×		×	
	Galette de céréales au fromage (sans soja), préemballé	(3)	×			×
	Galette ou pavé ou steak au soja et fromage, préemballé	(3)	×			×
	Saucisse végétale à base de blé (type Wheaty)	(1)	×			×
	Saucisse végétale au blé ou seitan, préemballé	(3)	×			×
	Saucisse végétale au tofu (convient aux véganes ou végétaliens), préemballée	(3)	×			×
	Bouchées ou émincé ou escalope au soja et blé (ne convient pas aux véganes ou végétaliens), préemballé	(3)	×			
	Bouchées ou émincé ou escalope végétale au soja et blé (convient aux véganes ou végétaliens), préemballé	(3)	×			
	Boulette végétale au soja et/ou blé, préemballée	(3)	×			
	Escalope panée soja et blé (convient aux véganes ou végétaliens), préemballée	(3)	×			
	Escalope panée soja et blé (ne convient pas aux véganes ou végétaliens)	(3)	×			
	Escalope panée, soja, blé et fromage, type cordon bleu, préemballée	(3)	×			
	Escalope végétale ou steak à base de soja	(2)	×			
	Falafel ou Boulette de pois-chiche et/ou fève, frite	(2)	×			
	Falafel ou Boulette de pois-chiche et/ou fève, préemballé	(3)	×			
	Galette de céréales au soja (type Soy)	(1)	×			
	Galette de céréales aux légumes (sans soja), préemballé	(3)	×			

	Galette ou pavé ou steak au blé (seitan) et légumes, préemballé	(3)	×			
	Galette ou pavé ou steak au blé et soja (convient aux véganes ou végétaliens), préemballé	(3)	×			
	Galette ou pavé ou steak au blé et soja (ne convient pas aux véganes ou végétaliens), préemballé	(3)	×			
	Galette ou pavé ou steak au soja et légumes, préemballé	(3)	×			
	Galette ou pavé ou steak au soja, fromage et légumes, préemballé	(3)	×			
	Galette ou pavé ou steak aux lentilles, soja et légumes, préemballé	(3)	×			
	Nuggets de blé (sans soja), préemballé	(3)	×			
	Nuggets soja et blé (convient aux véganes ou végétaliens), préemballé	(3)	×			
	Nuggets soja et blé (ne convient pas aux véganes ou végétaliens), préemballé	(3)	×			
	Quenelle ou saucisse au tofu (ne convient pas aux véganes ou végétaliens), préemballée	(3)	×			
	Saucisse végétarienne au tofu (type Tofinelle)	(1)	×			
	Steak de lentilles végétal	(1)	×			
	Steak de soja au curry #2	(1)	×			
	Steak de soja aux fines herbes #2	(1)	×			
	Steak de soja aux petits légumes #1	(1)	×			
	Steak de soja aux petits légumes #2	(1)	×			
	Steak de soja nature	(1)	×			
	Steak de soja tomate-basilic #1	(1)	×			
	Steak de soja tomate-basilic #2	(1)	×			
	Steak de soja tomate-poivron #1	(1)	×			
	Steak de soja tomate-poivron #2	(1)	×			
	Steak végétal aux haricots rouges	(1)	×			
	Fève. cuite	(2)		×		
	Haricot blanc, appertisé, égoutté	(2)		×		
	Haricot blanc, cuit	(2)		×		
	Haricot flageolet, appertisé, égouttés	(2)		×		
	Haricot flageolet, cuit	(2)		×		
	Haricot mungo, cuit	(2)		×		
	Haricot rouge, appertisé, égoutté	(2)		×		
	Haricot rouge, cuit	(2)		×		
	Légume sec, cuit (aliment moyen)	(2)		×		
	Lentille, cuisinée, appertisée, égouttée	(2)		×		
	Lentille, cuite	(2)		×		
	Pois cassé, cuit	(2)		×		
	Pois chiche, appertisé, égoutté	(2)		×		

Tableau Supplémentaire 2. Score SecDiet et probabilités associées pour chaque nutriment dans le régime observé et les différents scénarios de substitution pour l'ensemble de la population, les hommes et les femmes de l'étude INCA3.

	Régime Observé	Substitution de la viande, du lait et des desserts lactés			Substitution de la viande				Substitution du lait et des desserts lactés		
		VPL-Moyen	VPL-Moy-plus	VPL-Moy-moins	V-Moyen	V-Legum	V-Moy-plus	V-Moy-moins	PL-Moyen	PL-Moy-plus	PL-Moy-moins
						Population totale					
SecDiet	0,91 ± 0,11[1]	0,90 ± 0,12	0,91 ± 0,11	**0,87 ± 0,13 -**	0,91 ± 0,11	0,91 ± 0,11	0,91 ± 0,11	0,90 ± 0,12	0,90 ± 0,11	0,91 ± 0,11	**0,88 ± 0,12 -**
Probabilités											
Vitamine A	0,86 ± 0,22	0,86 ± 0,22	0,87 ± 0,21	**0,81 ± 0,27 -**	0,87 ± 0,22	0,87 ± 0,22	0,86 ± 0,22	0,86 ± 0,22	0,86 ± 0,23	0,88 ± 0,21	**0,82 ± 0,26 -**
Vitamine B1	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
Vitamine B2	0,91 ± 0,18	**0,83 ± 0,26 -**	**0,87 ± 0,23 -**	**0,78 ± 0,29 -**	**0,88 ± 0,21 -**	0,89 ± 0,20	**0,89 ± 0,21 -**	**0,88 ± 0,22 -**	**0,88 ± 0,22 -**	**0,90 ± 0,20 -**	**0,84 ± 0,25 -**
Vitamine B3	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
Vitamine B9	0,92 ± 0,17	**0,94 ± 0,13 +**	**0,95 ± 0,12 +**	**0,89 ± 0,20 -**	**0,94 ± 0,13 +**	**0,96 ± 0,10 +**	**0,95 ± 0,12 +**	0,92 ± 0,16	0,91 ± 0,18	0,92 ± 0,17	**0,89 ± 0,20 -**
Vitamine B12	0,97 ± 0,06	**0,91 ± 0,17 -**	**0,92 ± 0,15 -**	**0,88 ± 0,20 -**	**0,92 ± 0,15 -**	**0,92 ± 0,15 -**	**0,92 ± 0,15 -**	**0,93 ± 0,15 -**	**0,96 ± 0,07 -**	0,97 ± 0,06	**0,95 ± 0,11 -**
Vitamine C	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,96 ± 0,09	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,08	0,97 ± 0,08	0,97 ± 0,07	0,96 ± 0,08
Calcium	0,91 ± 0,18	0,91 ± 0,18	**0,93 ± 0,16 +**	**0,90 ± 0,19 -**	**0,93 ± 0,15 +**	**0,93 ± 0,16 +**	**0,94 ± 0,15 +**	**0,94 ± 0,14 +**	**0,87 ± 0,21 -**	**0,89 ± 0,20 -**	**0,83 ± 0,25 -**
Fer	0,96 ± 0,08	**0,96 ± 0,07 +**	**0,97 ± 0,07 +**	**0,96 ± 0,08 +**	0,95 ± 0,09	**0,94 ± 0,10 -**	0,96 ± 0,09	**0,93 ± 0,11 -**	**0,97 ± 0,06 +**	**0,97 ± 0,07 +**	**0,98 ± 0,06 +**
Iode	0,87 ± 0,20	0,87 ± 0,20	**0,90 ± 0,17 +**	**0,84 ± 0,22 -**	0,88 ± 0,19	0,87 ± 0,19	0,88 ± 0,19	0,87 ± 0,20	0,86 ± 0,20	**0,89 ± 0,18 +**	**0,84 ± 0,22 -**
Sélénium	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02
Zinc	0,99 ± 0,04	0,99 ± 0,06	0,99 ± 0,05	0,98 ± 0,06	0,99 ± 0,06	**0,98 ± 0,06 -**	**0,99 ± 0,05 +**	0,99 ± 0,06	0,99 ± 0,05	0,99 ± 0,04	0,99 ± 0,05
						Hommes					
SecDiet	0,93 ± 0,10	0,92 ± 0,11	0,93 ± 0,11	**0,90 ± 0,13 -**	0,93 ± 0,11	0,93 ± 0,11	0,93 ± 0,11	0,92 ± 0,12	0,92 ± 0,11	0,93 ± 0,10	**0,91 ± 0,11 -**
Probabilités											
Vitamine A	0,86 ± 0,25	0,86 ± 0,25	0,87 ± 0,24	**0,82 ± 0,29 -**	0,87 ± 0,24	0,86 ± 0,24	0,86 ± 0,25	0,86 ± 0,25	0,86 ± 0,26	0,87 ± 0,24	**0,82 ± 0,28 -**
Vitamine B1	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
Vitamine B2	0,94 ± 0,16	**0,88 ± 0,24 -**	**0,90 ± 0,21 -**	**0,85 ± 0,27 -**	0,91 ± 0,2	0,92 ± 0,19	0,92 ± 0,19	**0,91 ± 0,21 -**	**0,92 ± 0,18 -**	0,93 ± 0,17	**0,90 ± 0,21 -**
Vitamine B3	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
Vitamine B9	0,94 ± 0,15	**0,96 ± 0,12 +**	**0,96 ± 0,11 +**	0,93 ± 0,17	**0,96 ± 0,12 +**	**0,97 ± 0,09 +**	**0,96 ± 0,11 +**	0,95 ± 0,15	0,94 ± 0,16	0,94 ± 0,15	0,93 ± 0,18
Vitamine B12	0,97 ± 0,06	**0,92 ± 0,17 -**	**0,93 ± 0,16 -**	**0,91 ± 0,19 -**	**0,93 ± 0,16 -**	**0,93 ± 0,16 -**	**0,93 ± 0,16 -**	**0,94 ± 0,16 -**	0,97 ± 0,06	0,97 ± 0,06	**0,97 ± 0,07 -**
Vitamine C	0,97 ± 0,06	0,97 ± 0,06	0,97 ± 0,06	0,97 ± 0,08	0,97 ± 0,06	0,97 ± 0,06	0,97 ± 0,06	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07
Calcium	0,93 ± 0,16	0,94 ± 0,14	0,95 ± 0,13	0,94 ± 0,15	**0,95 ± 0,13 +**	0,95 ± 0,13	**0,96 ± 0,12 +**	**0,96 ± 0,12 +**	**0,91 ± 0,19 -**	0,92 ± 0,17	**0,89 ± 0,21 -**
Fer	0,98 ± 0,05	**0,98 ± 0,05 +**	**0,98 ± 0,05 +**	**0,98 ± 0,06 +**	0,97 ± 0,06	0,97 ± 0,07	**0,98 ± 0,06 +**	0,96 ± 0,08	**0,98 ± 0,04 +**	0,98 ± 0,05	**0,98 ± 0,04 +**
Iode	0,90 ± 0,18	0,91 ± 0,17	**0,93 ± 0,16 +**	0,89 ± 0,19	0,91 ± 0,17	0,91 ± 0,17	0,91 ± 0,17	0,9 ± 0,18	0,90 ± 0,18	0,92 ± 0,16	0,89 ± 0,19
Sélénium	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02
Zinc	0,99 ± 0,05	0,98 ± 0,07	0,99 ± 0,06	0,98 ± 0,07	0,99 ± 0,07	**0,98 ± 0,08 -**	0,99 ± 0,06	0,98 ± 0,07	0,99 ± 0,05	0,99 ± 0,05	0,99 ± 0,05
						Femmes					
SecDiet	0,89 ± 0,11	0,88 ± 0,12	0,90 ± 0,11	**0,85 ± 0,13 -**	0,89 ± 0,11	0,89 ± 0,11	0,89 ± 0,11	0,88 ± 0,12	0,88 ± 0,12	0,90 ± 0,11	**0,86 ± 0,12 -**
Probabilités											
Vitamine A	0,86 ± 0,20	0,86 ± 0,20	0,88 ± 0,19	**0,80 ± 0,25 -**	0,87 ± 0,20	0,87 ± 0,20	0,86 ± 0,20	0,86 ± 0,20	0,86 ± 0,20	0,88 ± 0,18	**0,82 ± 0,24 -**
Vitamine B1	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
Vitamine B2	0,89 ± 0,19	**0,78 ± 0,27 -**	**0,83 ± 0,24 -**	**0,71 ± 0,30 -**	**0,85 ± 0,22 -**	0,87 ± 0,21	0,86 ± 0,21	**0,85 ± 0,23 -**	**0,84 ± 0,23 -**	**0,87 ± 0,21 -**	**0,79 ± 0,26 -**
Vitamine B3	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	**1,00 ± 0,01 +**	**1,00 ± 0,01 +**	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01	1,00 ± 0,01
Vitamine B9	0,89 ± 0,18	**0,92 ± 0,14 +**	**0,94 ± 0,13 +**	**0,86 ± 0,21 -**	**0,93 ± 0,13 +**	**0,95 ± 0,11 +**	**0,93 ± 0,13 +**	0,90 ± 0,17	0,88 ± 0,18	0,90 ± 0,17	**0,85 ± 0,21 -**
Vitamine B12	0,96 ± 0,06	**0,89 ± 0,16 -**	**0,91 ± 0,14 -**	**0,85 ± 0,21 -**	**0,91 ± 0,14 -**	**0,92 ± 0,14 -**	**0,91 ± 0,14 -**	**0,92 ± 0,14 -**	0,95 ± 0,08	0,96 ± 0,06	**0,93 ± 0,12 -**
Vitamine C	0,96 ± 0,08	0,96 ± 0,08	0,96 ± 0,08	0,96 ± 0,10	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,97 ± 0,07	0,96 ± 0,08	0,96 ± 0,08	0,96 ± 0,08	0,96 ± 0,09
Calcium	0,88 ± 0,20	0,88 ± 0,19	0,91 ± 0,17	0,86 ± 0,21 -	**0,91 ± 0,16 +**	0,91 ± 0,17	**0,92 ± 0,16 +**	**0,92 ± 0,15 +**	**0,84 ± 0,23 -**	**0,86 ± 0,21 -**	**0,78 ± 0,26 -**
Fer	0,94 ± 0,09	**0,95 ± 0,08 +**	**0,95 ± 0,08 +**	**0,95 ± 0,09 +**	**0,93 ± 0,11 -**	**0,92 ± 0,11 -**	0,94 ± 0,10	**0,90 ± 0,12 -**	**0,96 ± 0,07 +**	**0,95 ± 0,08 +**	**0,97 ± 0,07 +**
Iode	0,83 ± 0,20	0,83 ± 0,21	**0,88 ± 0,18 +**	**0,80 ± 0,23 -**	0,85 ± 0,19	0,84 ± 0,20	0,85 ± 0,19	0,83 ± 0,20	0,82 ± 0,22	**0,87 ± 0,19 +**	**0,80 ± 0,23 -**
Sélénium	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,03	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,02	0,99 ± 0,03
Zinc	0,99 ± 0,04	0,99 ± 0,05	0,99 ± 0,04	0,99 ± 0,05	0,99 ± 0,05	0,98 ± 0,05	**0,99 ± 0,04 +**	0,99 ± 0,05	0,99 ± 0,04	0,99 ± 0,04	0,99 ± 0,04

[1]Moyenne ± écart-type. +/- significativement supérieur/inférieur au régime observé, estimé par des tests de Kruskal-Wallis et de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner. Les cases en gras indiquent un résultat statistiquement différent du régime observé. P<0,05.
Données issues de l'étude INCA3 (n=2121 adultes dont 887 hommes et 1234 femmes)

Tableau supplémentaire 3. Variables d'entrées du modèle PRIME par sexe dans le régime observé et les différents régimes simulés.

	Régime Observé	Substitution de la viande, du lait et des desserts lactés			Substitution de la viande				Substitution du lait et des desserts lactés		
		VPL-Moyen	VPL-Moy-plus	VPL-Moy-moins	V-Moyen	V-Legum	V-Moy-plus	V-Moy-moins	PL-Moyen	PL-Moy-plus	PL-Moy-moins
						Hommes					
Fruits (g)[1]	235,0 ± 142,1[2]	237,6 ± 142,1	242,7 ± 146,7	226,1 ± 132,7	235,4 ± 143,1	244,6 ± 148,6	239,4 ± 145	233,1 ± 139,5	236,9 ± 141,3	238,5 ± 143,3	228,5 ± 136,3
Légumes (g)[1]	247,0 ± 138,8	243,5 ± 138,7	252,7 ± 144,3	230,7 ± 127,5	245,9 ± 139,2	254,3 ± 147,2	249,4 ± 143	240,3 ± 134,5	246,1 ± 137,9	249,6 ± 140,0	237,1 ± 132,7
Fibres (g)	22,1 ± 8,4	28,4 ± 10,0	28,4 ± 10,0	25,6 ± 9,0	27,2 ± 9,7	30,2 ± 11,2	26,9 ± 9,7	24,4 ± 8,8	23,3 ± 8,7	23,6 ± 8,8	23,5 ± 8,7
Sel (g)	9,0 ± 3,7	9,6 ± 3,9	9,0 ± 3,7	9,5 ± 3,8	9,7 ± 3,8	9,1 ± 3,7	8,9 ± 3,7	9,9 ± 3,9	8,9 ± 3,7	9,1 ± 3,7	8,6 ± 3,7
Lipides totaux (%E)	32,8 ± 6,5	32,5 ± 6,1	31,9 ± 6,3	34,3 ± 5,8	32,4 ± 6,2	30,1 ± 6,7	31,7 ± 6,3	33,4 ± 6,1	32,9 ± 6,5	33 ± 6,5	33,8 ± 6,3
AG saturés (%E)	13,9 ± 3,5	12,1 ± 3,5	11,9 ± 3,7	13,5 ± 3,3	12,7 ± 3,6	12,8 ± 3,7	12,7 ± 3,6	13,0 ± 3,4	13,4 ± 3,5	13,1 ± 3,5	14,3 ± 3,4
AG mono insaturés (%E)	11,2 ± 3,2	11,3 ± 3,0	10,5 ± 3,2	11,5 ± 2,9	11,2 ± 3,1	9,9 ± 3,3	10,3 ± 3,2	11,3 ± 3,0	11,3 ± 3,2	11,4 ± 3,2	11,3 ± 3,1
AG poly insaturés (%E)	4,2 ± 1,5	5,7 ± 1,7	6,0 ± 1,8	6,2 ± 1,8	5,2 ± 1,7	4,0 ± 1,5	5,2 ± 1,7	5,7 ± 1,9	4,8 ± 1,5	4,9 ± 1,6	4,7 ± 1,4
Cholestérol alimentaire (mg)	338,3 ± 189,8	231,2 ± 173,4	236,7 ± 178,2	222,7 ± 164,5	246,3 ± 174,3	255 ± 180,7	248,2 ± 176,8	247,5 ± 170,9	323,1 ± 189,1	327,6 ± 191,0	310,7 ± 184,6
Viande rouge (g)	74,3 ± 76,7	4,5 ± 11,9	4,6 ± 12,4	4,2 ± 11,1	4,5 ± 11,9	4,7 ± 12,6	4,5 ± 12,1	4,4 ± 11,5	74,1 ± 76,6	75,2 ± 77,7	71,1 ± 73,7
Charcuterie (g)	45,4 ± 49,5	30,9 ± 37,5	32,0 ± 38,5	28,8 ± 35,5	31,0 ± 37,4	32,4 ± 38,9	31,5 ± 38	30,2 ± 36,7	45,4 ± 49,6	46 ± 50,1	43,7 ± 48,2
						Femmes					
Fruits (g)	204,7 ± 98,3	205 ± 95,5	209,7 ± 99,9	190,1 ± 89,1	204,9 ± 97,4	211,1 ± 102,0	207,8 ± 99,0	200,3 ± 95,6	204,6 ± 96,8	207,3 ± 98,8	196,4 ± 91,7
Légumes (g)	243,6 ± 117,8	239 ± 115,7	248,6 ± 120,8	219,7 ± 107,3	241,6 ± 117,4	250,3 ± 121,9	246,1 ± 119,1	237,8 ± 114,3	241,1 ± 116,4	245,7 ± 119,3	228,2 ± 110,2
Fibres (g)	18,1 ± 6,5	22,5 ± 7,1	22,7 ± 7,2	20,7 ± 6,7	21,4 ± 7,0	23,5 ± 7,6	21,2 ± 7,0	19,5 ± 6,6	19,2 ± 6,7	19,5 ± 6,8	19,4 ± 6,7
Sel (g)	7,0 ± 2,8	7,4 ± 2,8	7,0 ± 2,8	7,1 ± 2,8	7,5 ± 2,8	7,0 ± 2,8	6,9 ± 2,8	7,6 ± 2,8	6,9 ± 2,8	7,0 ± 2,8	6,5 ± 2,8
Lipides totaux (%E)	34 ± 5,5	34,1 ± 5,2	33,6 ± 5,3	36,1 ± 5,0	33,8 ± 5,4	31,8 ± 5,7	33,2 ± 5,4	34,7 ± 5,3	34,3 ± 5,3	34,4 ± 5,4	35,5 ± 5,1
AG saturés (%E)	14,3 ± 3,1	12,6 ± 3,0	12,3 ± 3,1	14,3 ± 2,9	13,3 ± 3,1	13,4 ± 3,2	13,3 ± 3,1	13,6 ± 3,0	13,7 ± 3,0	13,3 ± 3,2	15,0 ± 3,0
AG mono insaturés (%E)	11,6 ± 2,6	11,9 ± 2,5	11,2 ± 2,6	12,0 ± 2,4	11,7 ± 2,6	10,6 ± 2,7	10,9 ± 2,6	11,8 ± 2,5	11,8 ± 2,6	11,9 ± 2,6	11,8 ± 2,5
AG poly insaturés (%E)	4,5 ± 1,5	6,2 ± 1,6	6,5 ± 1,7	6,5 ± 1,6	5,4 ± 1,6	4,3 ± 1,5	5,4 ± 1,6	5,8 ± 1,7	5,3 ± 1,5	5,5 ± 1,6	5,2 ± 1,4
Cholestérol alimentaire (mg)	262,4 ± 136,9	183,2 ± 129,5	188,8 ± 133,6	173,0 ± 121,7	199,2 ± 130,8	205,9 ± 135	200,8 ± 132,5	199,6 ± 128,5	246 ± 135,9	250,9 ± 138,1	232,7 ± 131,0
Viande rouge (g)	43,7 ± 38,6	3,9 ± 9,3	4,0 ± 9,6	3,6 ± 8,6	3,9 ± 9,4	4,0 ± 9,8	3,9 ± 9,5	3,8 ± 9,2	43,3 ± 38,3	44,2 ± 39,0	40,9 ± 36,5
Charcuterie (g)	28,9 ± 29,8	21,4 ± 25,4	22,3 ± 26,1	19,6 ± 23,9	21,6 ± 25,5	22,5 ± 26,2	22,0 ± 25,8	21,2 ± 25,1	28,7 ± 29,6	29,2 ± 30,1	27,1 ± 28,5

[1] Uniquement les individus consommant au moins 80g/j de fruits/légumes.
[2] Moyenne ± écart-type.
Données issues de l'étude INCA3 (n=2121 adultes dont 887 hommes et 1234 femmes). AG, acides gras ; %E, % de l'apport énergétique sans alcool total.

Tableau supplémentaire 4. Estimation du nombre de morts évitées dans les différents régimes simulés, en comparaison au régime observé, en fonction des classes d'âge dans la population avec le modèle PRIME.

Classe d'âge		Mortalité de référence[1]	Substitution de la viande, du lait et des desserts lactés			Substitution de la viande				Substitution du lait et des desserts lactés		
			VPL-Moyen	VPL-Moy-plus	VPL-Moy-moins	V-Moyen	V-Legum	V-Moy-plus	V-Moy-moins	PL-Moyen	PL-Moy-plus	PL-Moy-moins
15-24 ans	**Population totale**	82	**3 (3,4%)[2]**	**4 (4,6%)**	**2 (2,1%)**	**2 (2,6%)**	**3 (4,0%)**	**3 (3,7%)**	**1 (1,4%)**	**1 (1,0%)**	**1 (1,1%)**	**1 (0,8%)**
	Hommes	47	2 (3,4%)	2 (4,5%)	1 (2,1%)	1 (2,6%)	2 (3,9%)	2 (3,7%)	1 (1,4%)	0 (1,0%)	0 (1,0%)	0 (0,8%)
	Femmes	35	1 (3,5%)	2 (4,6%)	1 (2,2%)	1 (2,6%)	1 (4,2%)	1 (3,6%)	0 (1,4%)	0 (1,0%)	0 (1,1%)	0 (0,9%)
25-34 ans	**Population totale**	471	**26 (5,5%)**	**29 (6,2%)**	**21 (4,5%)**	**23 (4,8%)**	**28 (5,9%)**	**26 (5,6%)**	**18 (3,8%)**	**4 (0,9%)**	**4 (0,8%)**	**5 (1,0%)**
	Hommes	269	12 (4,5%)	15 (5,6%)	9 (3,2%)	10 (3,7%)	14 (5,1%)	13 (4,9%)	7 (2,6%)	3 (1,0%)	3 (0,9%)	2 (0,8%)
	Femmes	202	14 (6,8%)	14 (7,1%)	12 (6,2%)	13 (6,2%)	14 (7,1%)	13 (6,5%)	11 (5,4%)	1 (0,7%)	1 (0,6%)	2 (1,1%)
35-44 ans	**Population totale**	2661	**185 (6,9%)**	**200 (7,5%)**	**157 (5,9%)**	**159 (6,0%)**	**184 (6,9%)**	**174 (6,5%)**	**135 (5,1%)**	**31 (1,2%)**	**30 (1,1%)**	**32 (1,2%)**
	Hommes	1341	82 (6,2%)	95 (7,1%)	62 (4,6%)	67 (5,0%)	81 (6,1%)	79 (5,9%)	52 (3,9%)	19 (1,5%)	20 (1,5%)	14 (1,0%)
	Femmes	1320	102 (7,7%)	105 (7,9%)	95 (7,2%)	93 (7,0%)	103 (7,8%)	95 (7,2%)	83 (6,3%)	11 (0,9%)	10 (0,7%)	18 (1,4%)
45-54 ans	**Population totale**	11417	**712 (6,2%)**	**796 (7,0%)**	**579 (5,1%)**	**642 (5,6%)**	**749 (6,6%)**	**723 (6,3%)**	**537 (4,7%)**	**88 (0,8%)**	**89 (0,8%)**	**75 (0,7%)**
	Hommes	6963	431 (6,2%)	504 (7,2%)	327 (4,7%)	387 (5,6%)	462 (6,6%)	457 (6,6%)	313 (4,5%)	57 (0,8%)	61 (0,9%)	30 (0,4%)
	Femmes	4454	281 (6,3%)	292 (6,6%)	252 (5,7%)	255 (5,7%)	288 (6,5%)	266 (6,0%)	223 (5,0%)	31 (0,7%)	28 (0,6%)	45 (1,0%)
55-64 ans	**Population totale**	28890	**1353 (4,7%)**	**1570 (5,4%)**	**1031 (3,6%)**	**1194 (4,1%)**	**1484 (5,1%)**	**1392 (4,8%)**	**942 (3,3%)**	**203 (0,7%)**	**209 (0,7%)**	**182 (0,6%)**
	Hommes	19479	760 (3,9%)	936 (4,8%)	524 (2,7%)	662 (3,4%)	868 (4,5%)	828 (4,3%)	487 (2,5%)	126 (0,6%)	133 (0,7%)	88 (0,4%)
	Femmes	9411	594 (6,3%)	633 (6,7%)	507 (5,4%)	531 (5,6%)	616 (6,6%)	564 (6,0%)	455 (4,8%)	78 (0,8%)	75 (0,8%)	95 (1,0%)
65-74 ans	**Population totale**	37838	**1317 (3,5%)**	**1588 (4,2%)**	**861 (2,3%)**	**1113 (2,9%)**	**1537 (4,1%)**	**1355 (3,6%)**	**751 (2,0%)**	**247 (0,7%)**	**270 (0,7%)**	**211 (0,6%)**
	Hommes	25292	710 (2,8%)	917 (3,6%)	373 (1,5%)	590 (2,3%)	884 (3,5%)	778 (3,1%)	332 (1,3%)	146 (0,6%)	169 (0,7%)	89 (0,4%)
	Femmes	12546	607 (4,8%)	671 (5,3%)	488 (3,9%)	523 (4,2%)	654 (5,2%)	577 (4,6%)	419 (3,3%)	101 (0,8%)	101 (0,8%)	122 (1,0%)
75-84 ans	**Population totale**	58597	**1916 (3,3%)**	**2485 (4,2%)**	**1070 (1,8%)**	**1476 (2,5%)**	**2465 (4,2%)**	**1974 (3,4%)**	**688 (1,2%)**	**536 (0,9%)**	**564 (1,0%)**	**548 (0,9%)**
	Hommes	32833	828 (2,5%)	1157 (3,5%)	348 (1,1%)	634 (1,9%)	1169 (3,6%)	939 (2,9%)	194 (0,6%)	236 (0,7%)	261 (0,8%)	218 (0,7%)
	Femmes	25764	1088 (4,2%)	1328 (5,2%)	722 (2,8%)	843 (3,3%)	1296 (5,0%)	1036 (4,0%)	494 (1,9%)	299 (1,2%)	302 (1,2%)	330 (1,3%)
Total[3]	**Population totale**	139956	**5513 (3,9%)**	**6671 (4,8%)**	**3721 (2,7%)**	**4609 (3,3%)**	**6450 (4,6%)**	**5648 (4,0%)**	**3072 (2,2%)**	**1111 (0,8%)**	**1165 (0,8%)**	**1054 (0,8%)**
	Hommes	86224	2825 (3,3%)	3626 (4,2%)	1644 (1,9%)	2351 (2,7%)	3478 (4,0%)	3096 (3,6%)	1385 (1,6%)	588 (0,7%)	647 (0,8%)	441 (0,5%)
	Femmes	53732	2688 (5,0%)	3045 (5,7%)	2078 (3,9%)	2258 (4,2%)	2972 (5,5%)	2552 (4,7%)	1686 (3,1%)	523 (1,0%)	518 (1,0%)	613 (1,1%)

[1] Données issues du Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès (4).
[2] Nombre de morts prématurées évitées (% de morts prématurées évitées par rapport à la mortalité de référence).
[3] Somme des différentes classes d'âge.

Références

1. Etude NutriNet-Santé. Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database). Paris: Economica; 2013.

2. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016 [Internet]. 2016. Available from: https://ciqual.anses.fr/

3. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2020 [Internet]. 2020. Available from: https://ciqual.anses.fr/

4. Inserm CépiDC. Centre d'épidémiologie sur les causes médicales de décès [Internet]. Available from: https://www.cepidc.inserm.fr/

2.6. Article n°6 : Les bénéfices sur la qualité de l'alimentation de la substitution de la viande peuvent être élevés si la composition nutritionnelle des substituts de viande est optimisée : une étude de modélisation chez les adultes français (INCA3).

Résumé

Contexte : Il y a une demande croissante des consommateurs pour les substituts de viande. Or, ces produits peuvent avoir des compositions (en termes d'ingrédients et de nutrition) très variées ce qui interroge sur leur intérêt nutritionnel pour remplacer la viande.

Objectif : Identifier quelle serait la composition optimale d'un substitut de viande qui permettrait de maximiser la qualité de l'alimentation lors de la substitution complète de la viande.

Méthode : A partir d'un individu moyen, représentant les consommations alimentaires des adultes français (INCA3, n=1125, 18-64 ans), la viande a été remplacée par la même quantité d'un substitut végétal de viande. La composition en ingrédient de ce substitut a été optimisée, à partir d'une liste de 159 ingrédients, de manière à maximiser le PANDiet lors de la substitution de la viande. Des contraintes nutritionnelles ont été appliquées, afin de ne pas augmenter le risque de carence pour 12 nutriments indispensables, ainsi que des contraintes technologiques afin d'assurer que le substitut ainsi obtenu pourrait être formulé en conditions réelles. L'impact de ce substitut optimisé sur la qualité de l'alimentation a été analysé et comparé avec l'impact de 43 substituts de viande déjà existants.

Résultats : Le substitut de viande ainsi optimisé contient 13 ingrédients (dont 42% de haricot coco et 15% de poivron jaune). Comparé au PANDiet du régime observé de l'individu moyen (73,7), l'intégration du substitut optimisé augmente le PANDiet de 5,7 points. A titre de comparaison, la substitution avec les substituts déjà existants entraîne une variation du PANDiet comprise entre -3,1 et + 1,5 points. L'augmentation du PANDiet provient essentiellement d'une augmentation des probabilités d'adéquation de nutriments actuellement insuffisamment consommés (acide alpha-linolénique, fibres, acide linoléique) et d'une diminution de la consommation d'acides gras saturés. Le substitut de viande intégré dans les régimes permettait également de compenser en partie la diminution des probabilités d'adéquation pour les nutriments apportés par la viande (vitamine B6, potassium, fer absorbé), à l'exception du zinc absorbé et de la vitamine B12.

Conclusion : Nous avons montré qu'il était possible de choisir des ingrédients appropriés pour concevoir un substitut de viande permettant à la fois de compenser en partie les nutriments apportés par la viande et de contribuer aux apports en nutriments actuellement insuffisamment consommés.

Valorisation : Ce travail a été soumis à la revue *European Journal of Nutrition* le 21 juin 2021.

Messages clés

- Il est possible de concevoir théoriquement un substitut végétal de viande permettant d'améliorer la qualité de l'alimentation en étant composé d'ingrédients culinaires simples et peu transformés.
- L'intégration de contraintes technologiques dans le modèle d'optimisation permet d'aller au-delà de la dimension nutritionnelle théorique et de modéliser un substitut qui pourrait avoir un aspect similaire à une galette végétale.
- Les bénéfices sur la qualité de l'alimentation du substitut optimisé sont très supérieurs à ceux des substituts existants sur le marché.
- Un substitut végétal de viande avec une composition nutritionnelle optimisée permet à la fois d'apporter des nutriments essentiellement d'origine végétale et insuffisamment consommés dans la population et de certains nutriments classiquement apportés par la viande.

The potential effects of meat substitution on diet quality could be high if meat substitutes are optimized for nutritional composition – a modeling study in French adults (INCA3).

Marion Salomé[1], François Mariotti[1], Marie-Charlotte Nicaud[2], Alison Dussiot[1], Emmanuelle Kesse-Guyot[3], Marie-Noëlle Maillard[2], Jean-François Huneau[1], Hélène Fouillet[1]

[1]Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France

[2]Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SayFood, 91300 Massy, France

[3]Sorbonne Paris Nord University, INSERM U1153, INRAe U1125, CNAM, Nutritional Epidemiology Research Team (EREN), Epidemiology and Statistics Research Center – University of Paris (CRESS), Bobigny, France

Corresponding author: François Mariotti, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France francois.mariotti@agroparistech.fr

ORCID: François Mariotti: 0000-0002-4516-3853; Emmanuelle Kesse-Guyot: 0000-0002-9715-3534; Jean-François Huneau: 0000-0001-7336-2617; Hélène Fouillet: 0000-0003-3932-251X

Acknowledgements

The authors would like to thank the Nutritional Epidemiology Research Team (EREN) at Université Paris 13, France for supplying the nutritional compositions of plant-based substitutes extracted from the food composition table of the NutriNet-Santé Study.

List of abbreviations

ALA, alpha-linolenic acid; ANSES, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety; AS, Adequacy Sub-score; CIQUAL, French Information Centre on Food Quality; INCA3, Third Individual and National Study on Food Consumption Survey; LA, linoleic acid; MS, Moderation Sub-score; PANDiet, Probability of Adequate Nutrient Intake; SFA; saturated fatty acids.

Declaration

Funding
MS's PhD fellowship is currently being funded in part by a research contract with Terres Univia, the French Interbranch organization for plant oils and proteins. FM is the scientific leader of this contract.

Conflicts of interest/Competing interests
The authors declare that they have no competing interests.

Ethics approval
The INCA3 study was carried out in accordance with the Declaration of Helsinki guidelines and was approved by the 'Comité Consultatif sur le Traitement de l'Information en matière de Recherche dans le domaine de la Santé' (Advisory Committee on Information Processing in Health Research).

Consent to participate
For the data collection of the INCA3 survey, oral consent was obtained, witnessed and formally recorded from participants.

Consent for publication
Not applicable

Availability of data and material
The datasets of the INCA3 survey are available at data.gouv.fr.

Code availability
Not applicable

Authors' contributions
Marion Salomé, Hélène Fouillet and François Mariotti designed the research; Marion Salomé, Hélène Fouillet et Marie-Charlotte Nicaud conducted the research; Marion Salomé, Hélène Fouillet et François Mariotti analyzed data; Alison Dussiot, Emmanuelle Kesse-Guyot, Marie-Noëlle Maillard and Jean-François Huneau provided methodological support; Marion Salomé wrote the first draft of the manuscript and all authors provided critical comments on the manuscript. Marion Salomé, François Mariotti and Hélène Fouillet had primary responsibility for the final content and all authors have read and approved the final manuscript.

Abstract

Purpose. While consumer demand for meat substitutes is growing, their varied composition raises questions regarding their nutritional value. We aimed to identify and characterize the optimal composition of a meat substitute that would best improve diet quality after complete meat replacement.

Methods. From an average individual representing the dietary intake of French adults (INCA3, n=1125), meat was replaced with an equivalent amount of plant-based substitute, whose composition was based on a list of 159 possible ingredients and optimized non-linearly to maximize diet quality assessed with the PANDiet score (considering adequacy for 32 nutrients), while taking account of technological constraints and applying nutritional constraints to limit the risk of overt deficiency in 12 key nutrients.

Results. The optimized meat substitute contained 13 minimally processed ingredients. When used to substitute meat, the PANDiet score increased by 5.7 points above its initial value before substitution (versus -3.1 to +1.5 points when using other substitutes on the market), mainly because of higher intakes of nutrients that are currently insufficiently consumed (e.g. alpha-linolenic acid, fiber, linoleic acid) and a lower SFA intake. The meat substitute also mostly compensated for the lower provision of some indispensable nutrients to which meat greatly contributed (e.g. vitamin B6, potassium, bioavailable iron), but it could not compensate for bioavailable zinc and vitamin B12.

Conclusion. We evidenced that choosing the correct ingredients can result in a nutritionally highly effective meat substitute that could compensate for reductions in many nutrients supplied by meat while providing key nutrients that are currently insufficiently consumed.

Keywords: Plant-based substitutes; Nutrient composition; Mathematical optimization; Nonlinear programming; Diet quality.

Introduction

Meat substitutes, also called meat analogues or meat replacers, are designed to mimic the appearance and practical uses of meat products [1]. While some meat alternatives, such as tofu or tempeh formed part of the traditional diet in Asia [2, 3], more recent products are emerging and seeing rapid market growth [4, 5]. These products, such as plant-based sausages or patties, are not just intended for vegetarians but for all consumers who are willing to reduce their meat consumption [4, 5].

Indeed, reducing meat consumption is advocated for both health and environmental reasons [6–8]. However, in industrialized countries, meat plays an important cultural and structural role in meals, which make it little acceptable for many consumers to removed it from a meal pattern [9–11]. In this context, meat substitutes might be expected to be more acceptable than classic plant-based foods such as pulses because they can be used in the same way as meat and do not require changes to the meal structure [9].

From a nutritional standpoint, meat is an important contributor to micronutrient intake, and especially of iron, zinc and some B-vitamins [12–15]. Therefore, when rearranging diets in order to adopt more sustainable diets, attention should be paid to ensuring adequate nutrient intakes [13, 16, 17]. However, the formulation of meat substitutes generally tends to be more driven by attempts to imitate the organoleptic properties of meat (aspect, texture, flavor) than ensuring an appropriate nutrient composition [5]. The main ingredients composing meat substitutes are generally soy, wheat or pea proteins because of their technological functional properties (such as a fibrous-like texture and emulsification) [4, 5, 18] but many ingredients can be used, such as all kind of pulses, cereals, vegetables, herbs and spices [4, 18], leading to a multitude of possibilities of formulation.

The nutritional composition of meat substitutes has been previously studied and compared to that of meat [19, 20], and mathematical optimization has been used to identify a meat substitute formulation with the closest nutritional composition to that of meat [21]. However, assessing the nutritional quality of a meat substitute requires to go beyond its intrinsic nutrient composition and to fully characterize the impact of its integration into the diet at a given expected level of consumption [22, 23]. To our knowledge, no information is available regarding possible optimization of the nutritional composition of a meat substitute in order to maximize overall diet quality.

Our aim during this study was therefore to evaluate to what extent a meat substitute with optimum nutritional design could improve diet quality when fully replacing meat. We used mathematical optimization to determine the best ingredients for a meat substitute that would maximally improve the overall nutrient adequacy of the diet of French adults but without jeopardizing nutrient security for a subset of critical nutrients. The aim was to design a meat substitute using minimally processed ingredients, given growing concerns with respect to ultra-processed foods [24]. We then analyzed the impact of this optimized meat substitute, and the role of the selected ingredients, on the diet quality and compared it with a large market sample of meat substitutes currently available.

Data and methods

In this study, the composition of a meat substitute intended to completely replace meat was optimized in order to best improve the diet quality of French adults.

Input dietary data

The data used in this study came from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (INCA3), performed in mainland France in 2014-2015. The INCA3 survey is a French nationwide and representative cross-sectional survey and its design has been fully described elsewhere [25]. Men participants aged 18-64y and women participants aged 18-54y were included in the study. Under-reporters for energy intake were excluded using Henry's equations [26] and the cutoffs proposed by Black [27]. The final sample contained 1125 adults (564 men and 561 women) (Supplementary Figure S1).

Dietary data were collected by professional investigators assisted by dietary software and using three non-consecutive 24h-dietary recalls spread over a 3-week period. Participants were not aware beforehand of the days of recall. Portion sizes were estimated using validated photographs [25]. The nutrient content of foods and beverages came from the 2016 food composition database from the French Information Center on Food Quality (CIQUAL) [28]. Over all foods consumed, meat or processed meat usually eaten in the main dish were identified as 'meat food items', excluding composite dishes (e.g. lasagna) (Supplementary Table S1). Foods that were not identified as meat food items are referred to hereinafter as 'non-meat food items'. The mean nutrient intakes from meat food items and non-meat food items were then calculated for men and women separately, using the weighted schemes proposed in INCA3 to account for the complex survey design [25]. This resulted in average man and woman individuals with mean nutrients intakes for each sex.

Evaluation of diet quality

Diet quality was evaluated using the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) scoring system [29], which reflects the probability for an individual of having an adequate nutrient intake (Supplementary Table S2). The PANDiet is the mean of two sub-scores: the Adequacy Sub-score (AS), which measures the probability of adequacy of intake, and the Moderation Sub-score (MS), which measures the probability of not having an excessive intake of nutrients that need to be limited. The AS is the mean of probabilities for 27 nutrients whose intakes need to be above the nutrient reference value, multiplied by 100. The MS is the mean of probabilities of 6 nutrients whose intakes should be below an upper bound reference value, multiplied by 100. The overall PANDiet score ranges from 0 to 100, with a higher score indicating better nutritional quality of the diet.

The probability of adequacy for each nutrient is calculated using the mean intake, the reference value, the variability of the reference value and the intra-individual variability of intake [29]. However, during this study, probabilities of adequacy were calculated for average man and woman individuals, so intra-individual variability was considered to be equal to zero. The reference values were extracted from the 2021 dietary guidelines released by ANSES [30]. For iron and zinc, we considered the estimated requirement for the absorbed form and an equation predicting

absorption from dietary intakes [31–33]. Moreover, to take account of the high requirement of iron for some women, the probability of adequacy of iron was calculated using two different reference values: women with low to moderate menstrual losses and women with elevated menstrual losses (about 20% of women) [30]. PANDiet was therefore calculated for the average man (PANDiet-M) and for the average woman using the reference values for iron for women with normal (PANDiet-F) or high iron requirements (PANDiet-F+). An averaged PANDiet was calculated as the mean of the PANDiet-M, the PANDiet-F and the PANDiet-F+ weighted by their respective distributions in the study population (50.13% of men, 49.87% of women with a weighting of 80% for PANDiet-F and 20% for PANDiet-F+).

Evaluation of the nutrient security of diet

The nutrient security of the diet was estimated using the SecDiet score, which measures the risk of having an overt nutrient deficiency [34]. The SecDiet is composed of 12 nutrients for which clinical signs of deficiency due to insufficient dietary intake have been documented: vitamin A, thiamin, riboflavin, niacin, folate, vitamin B12, vitamin C, iodine, selenium, iron, zinc and calcium. A deficiency threshold was defined for each nutrient and corresponded to the minimal intake below which clinical signs of deficiency may appear (Supplementary Table S3). The SecDiet is the mean of the squares of the 12 probabilities and ranges from 0 to 1 with a higher score reflecting a lower risk of nutrient deficiency. In the same way as the PANDiet, probabilities for each nutrient were calculated using the mean intake, the reference value (defined as the deficiency threshold) and the variability of the reference value.

Mathematical optimization of the meat substitute

The mathematical formulation of the problem consisted in finding the ingredient composition of a meat substitute replacing meat consumption that maximized the non-linear PANDiet score under nutritional and technological constraints (see below) in order to ensure both nutrient security and formulation feasibility. The problem was solved using a non-linear optimization algorithm (NLP, with multistart to avoid local minima) under the OPTMODEL procedure (SAS 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.).

Optimized meat substitute

The aim was to model a meat substitute that was entirely plant-based (i.e. containing no animal-based ingredients) and composed of little-processed ingredients. Thus only minimally processed, common culinary ingredients of plant origin were included (e.g. tofu or textured soy protein were not included as they are processed, but cooked pulses were included). A total of 159 ingredients for which a complete nutritional composition could be extracted from the CIQUAL 2020 food composition database [35] were categorized into groups and sub-groups (pulses, vegetables, cereals, oil-rich foods, etc.) (Supplementary Table S4).

The nutrient contents of the ingredients were given for their cooked form when available (e.g. for pulses or vegetables) or raw form for other ingredients (e.g. oils, flours, etc.). Although the nutrient content of a cooked ingredient already takes account of possible losses during cooking, we applied a retention factor (i.e. the percentage of nutrient content retained after cooking) to the nutrient composition of the optimized meat substitute by considering cooking using dry heat to reproduce

an industrial process [36]. Nutrients for which significant losses were expected during cooking were vitamin A (retention factor=93%), thiamin (78%), riboflavin (98%), niacin (98%), pantothenic acid (88%), vitamin B6 (95%), folate (68%) and vitamin C (78%).

The meat substitute was designed to replace by the same quantity, the mean quantity of all meat food items consumed by each sex (125.3g for men and 79.7g for women), while the intake of non-meat food items was kept constant. The optimization results (i.e., decision variables) were the proportions of each ingredient (from the 159 possible) used to compose the optimized meat substitute (under the obvious constraint that the sum of the proportions equaled 100%).

Objective function

The objective was to maximize overall adequacy in nutrient intake using the averaged PANDiet score as the objective function.

Nutritional constraints

Nutritional constraints were applied to the 12 critical nutrients included in the SecDiet, in order to limit any increased risk of deficiency in the diet after meat substitution. For these nutrients, the probability of sufficient intake in the modeled diet (with meat replaced with the optimized meat substitute) had to be ≥99% of the corresponding probability in the observed diet. Constraints were also applied to nine nutrients (retinol, niacin, vitamin B6, vitamin D, calcium, copper, iodine, selenium, zinc) to maintain their intakes in the modeled diet below their tolerable upper intake levels, as defined by ANSES [30] (Supplementary Table S2).

In order to minimize effects on the energy intake of subjects, the energy content of the optimized meat substitute was also limited to ±20% of the energy intake supplied by meat food items to each sex. This resulted in a change in the total energy intake of the diet limited to ±1.9% for the average man and ±1.5% for the average woman.

Technological constraints

Several technological constraints were applied:

- Water content constraint: the range of the water arising from ingredients in the optimized meat substitute had to be between 50 and 65g water per 100g, and was defined to ensure a water content similar to that of other meat substitutes available [35].
- Ingredient groups constraints: several constraints were applied to specify the acceptable proportions of ingredients from the same group or sub-group in order to obtain the composition of a meat substitute that could be easily formulated (Supplementary Table S5). These constraints were based on the ingredient lists of meat substitutes available in supermarkets and on the nutritional properties (sources of lipids, protein, fiber, etc.) and technological properties (binding, texturizing ingredients, etc.) of the different ingredient groups and sub-groups (Supplementary Table S4). The aim was to model a meat substitute that could be a pulse-based patty (40% to 60% of pulses among all ingredients).
- Ingredient number constraints: the number of ingredients from each sub-group was restricted to two in order to limit the total number of ingredients while allowing some flexibility.

Sensitivity analysis

After running the optimization procedure and obtaining the composition of the meat substitute, we tested the degree to which the selected recipe had a nutritional advantage over its possible alternatives. This was done by discarding each of the selected ingredients one by one, by adding a new constraint so that the proportion of the ingredient would be equal to zero, in order to assess the impact of any alternative on PANDiet. We also evaluated the influence of the technological constraints on the composition and nutritional efficiency of the optimized meat substitute.

Moreover, to identify the active constraints that influenced the solution, we estimated the dual values associated with each of the nutritional and technological constraints. Dual values were estimated using the optimization algorithm in order to represent the potential gain in objective function (PANDiet) for the relaxation by one unit of the limiting bound of the constraint being considered.

Effects of the optimized meat substitute on diet quality

Comparison with existing meat substitutes

Several modeled diets were designed to study the impacts of meat substitutes on diet quality both globally (averaged PANDiet), and in men and women separately. For the average man and woman, meat food items were replaced by the same quantity of the optimized meat substitute or of 43 existing meat substitutes available in the CIQUAL 2016 and 2020 databases and the NutriNet-Santé food composition table [28, 35, 37] (Supplementary Table S6). We therefore modeled 44 diets: one with the optimized meat substitute and 43 with existing meat substitutes. In addition, a modeled diet was designed by simply deleting all meat food items in order to study their contribution to diet quality as they are currently consumed.

These modeled diets were adjusted for energy, by reporting the difference of energy between meat food items and the meat substitute into changes in the amounts of non-meat food items. For the no-meat scenario, the quantities of non-meat food items were increased to maintain the same energy intake. The results are presented with and without energy adjustments.

Inter-individual variability

To obtain a more accurate estimate of the effects of the optimized meat substitute on the diet quality of the population, we simulated the substitution of meat food items with the optimized meat substitute in the diet of each participant (n=564 men, 561 women). The meat food items consumed were identified for each participant and replaced with the same quantity of the optimized meat substitute. The difference of energy was adjusted using the rest of the diet. The SecDiet and PANDiet scores and sub-scores were calculated, taking account of intra-individual variability between the days of recall. Differences between the observed and modeled diets were evaluated using Student’s t-test.

Results

Optimized meat substitute: composition and impacts on diet quality

The optimized meat substitute was composed of 13 ingredients (Table 1). It contained 8.5g/100g protein (supplied mostly by navy bean, wheat germ and flaxseed), was low in saturated fatty acids (0.9g/100g) and rich in fiber (13g/100g). Ingredients contributed differently to the nutrient composition of the meat substitute. Thyme, navy bean and wheat bran were the main contributors to iron content, and dried shiitake mushroom to B-vitamins, whereas flaxseed contributed to 68% of the alpha-linolenic acid (ALA) content and yellow sweet pepper to 91% of the vitamin C content (Supplementary Table S7).

Table 1. Ingredient composition of the optimized meat substitute

Ingredient groups and sub-groups			Ingredient	Proportion (%) in the optimized meat substitute
		Pulses	Navy bean, boiled/cooked in water	41.6
			Chick pea, boiled/cooked in water	5.8
		Vegetables, cooked	Pepper, sweet, yellow, pan-fried, without fat	15.0
Fragmented cereals		>10g/100g of protein	Wheat bran	5.6
			Wheat germ	4.4
		<10g/100g of protein	Couscous (precooked durum wheat semolina), cooked, unsalted	5.0
		Nuts and seeds	Flaxseed	5.0
		Vegetables and fruits, dried	Shiitake mushroom, dried	5.0
		Vegetable oils	Rapeseed oil	3.6
			Sunflower oil	1.4
		Starch	Potato starch	3.9
		Tubers and garden peas	Sweet potato, cooked	2.7
		Herbs, spices and salt	Thyme, dried	1.0

Compared to the initial observed diet, replacing meat with the optimized meat substitute resulted in a 5.7-point increase in the PANDiet score, with energy adjustment (or +5.5 points otherwise) (Table 2). This resulted from an increase in AS by +6.1 points and in MS by +5.3 points. In greater detail, the probabilities of adequacy mainly increased for ALA, fiber, linoleic acid (LA), vitamin C and folate with respect to AS, and sodium and SFA with respect to MS. By contrast, some probabilities of adequacy decreased, notably for vitamin B12, bioavailable zinc, bioavailable iron and vitamin B6 with respect to AS. However, these decreases were less marked when compared to a situation where meat was withdrawn and not replaced by the meat substitute ("Modeled diet without meat"), except for zinc (-0.30) and vitamin B12 (-0.33). On the contrary, for potassium, the decrease due to removing meat was totally compensated by the meat substitute. Concerning nutrient security, the SecDiet score remained stable, although the probability for iron slightly

decreased (-0.01) but less than without meat. Lastly, the PANDiet gain was more important in men (+6.2) than in women (+5.2), because the MS increase was more pronounced in men (+6.3) than in women (+4.3) while the increase in AS was similar (+6.1) (Supplementary Table S8). When replacing meat with the optimized meat substitute at an individual level in order to consider inter-individual variations, the PANDiet gain was less marked and increased from 67.6 ± 5.8 to 71.2 ± 6.3 for women and from 67.7 ± 6.2 to 72.1 ± 7.3 for men (Supplementary Table S9).

The impact of the optimized meat substitute on diet quality was compared to the impacts of existing meat substitutes (Fig. 1). In modeled diets adjusted for energy intake, where meat was replaced by existing meat substitutes, the PANDiet score ranged from 70.6 to 75.1 (i.e. -3.1 to +1.5 compared to the initial PANDiet), depending on the meat substitute, with a mean at 73.0. Only about a quarter of the meat substitutes (upper whisker of the boxplot) increased the PANDiet score above its value in the observed diet (73.7). These increases were much lower than that resulting from using the optimized meat substitute (79.4). AS from modeled diets with existing meat substitutes were more spread out (72.4 to 80.7, with a mean at 77.2) but always lower than the AS reached with the optimized meat substitute (84.6). Differences between the optimized and existing meat substitutes were less marked for MS. The results were similar when the modeled diets were not adjusted for energy intake (Supplementary Figure S2).

Table 2. PANDiet, AS, MS, SecDiet and probabilities of adequacies in the observed average diet, in modeled diets without meat and in modeled diets where meat was substituted by the optimized meat substitute

	Observed initial diet	Modeled diet without meat		Modeled diet with the optimized meat substitute	
		With energy adjustment [a]	Without energy adjustment	With energy adjustment [a]	Without energy adjustment
		Difference from observed initial diet			
PANDiet score (0-100)	73.68	**-2.53**[b]	**-2.50**	**+5.68**	**+5.48**
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	78.55	**-2.36**	**-7.91**	**+6.06**	**+6.43**
Probabilities of adequacy for AS components (0-1)					
Protein	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LA	0.50	**-0.07**	**-0.07**	**+0.38**	**+0.38**
ALA	0.00	**0.00**	**0.00**	**+0.88**	**+0.87**
DHA	0.25	+0.07	-0.06	-0.05	-0.03
EPA+DHA	0.09	+0.04	-0.03	-0.02	-0.02
Fiber	0.36	**+0.17**	**-0.01**	**+0.63**	**+0.63**
Vitamin A	0.96	+0.01	-0.07	-0.02	-0.01
Thiamine	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Riboflavin	1.00	0.00	-0.03	-0.01	0.00
Niacin	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pantothenic acid	0.99	-0.01	-0.03	+0.01	+0.01
Vitamin B-6	0.98	**-0.19**	**-0.42**	**-0.05**	**-0.04**
Folate	0.89	**+0.05**	**-0.04**	**+0.08**	**+0.08**
Vitamin B-12	1.00	**-0.16**	**-0.31**	**-0.33**	**-0.31**
Vitamin C	0.50	**+0.21**	**-0.04**	**+0.34**	**+0.36**
Vitamin D	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vitamin E	0.99	0.00	0.00	+0.01	+0.01
Iodine	0.98	+0.01	-0.01	0.00	0.00
Magnesium	0.99	0.00	-0.01	+0.01	+0.01
Phosphorus	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Potassium	0.84	**-0.02**	**-0.15**	**+0.04**	**+0.05**
Selenium	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zinc	0.46	**-0.42**	**-0.44**	**-0.30**	**-0.30**
Copper	0.99	0.00	-0.01	+0.01	+0.01
Manganese	0.99	+0.01	0.00	+0.01	+0.01
Calcium	0.97	0.02	-0.01	+0.02	+0.02
Iron	0.85	**-0.29**	**-0.35**	**-0.08**	**-0.08**
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	68.80	**-2.71**	**+2.91**	**+5.30**	**+4.53**
Probabilities of adequacy for MS components (0-1)					
Carbohydrates	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Protein	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total fat	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFA	0.08	**+0.04**	**+0.04**	**+0.19**	**+0.19**
Sodium	0.38	**-0.04**	**+0.13**	**+0.15**	**+0.12**
Sugars without lactose	0.66	-0.16	+0.01	-0.02	-0.04
SecDiet (0-1)	1.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00
Probabilities of adequacy of the SecDiet (0-1)					
Vitamin A	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Thiamine	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Riboflavin	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Niacin	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Folate	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vitamin B-12	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vitamin C	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Iodine	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selenium	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zinc	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Calcium	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Iron	0.99	**-0.03**	**-0.05**	**-0.01**	**0.00**

[a] Energy adjustment was done by adjusting the quantity consumed of non-meat food items in order to keep the same total energy intake as the observed initial diet.
[b] Values are differences between the modeled diet and the observed initial diet. Values in bold are those most affected by the removal and/or replacement of meat.

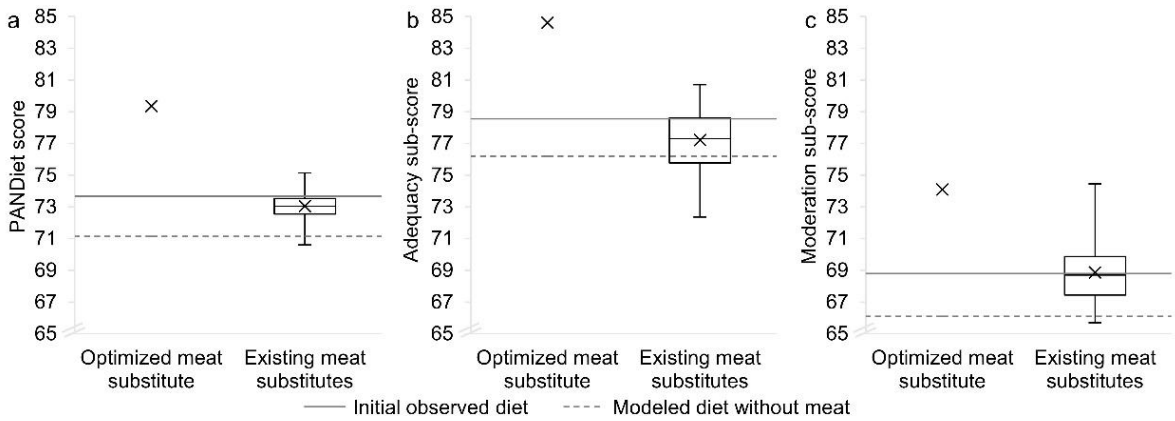


Fig. 1 a. PANDiet, b. AS and c. MS scores in modeled diets where meat food items were replaced with the optimized meat substitute or with existing meat substitutes (n=43). Modeled diets were adjusted for energy intake to maintain the same energy as the initial observed diet. Whiskers of the boxplot represent min and max of scores obtained in modeled diets with currently available meat substitutes. Horizontal lines represent scores in the initial diet (full line) or in a modeled diet without meat where meat food items were removed and adjusted for energy intake in the rest of the diet (dashed line)

Sensitivity analysis: influence of model constraints and overall stability of the selected recipe.

Among the active constraints that influenced the solution some were more binding than others, as shown by their dual values indicating a potential gain in the PANDiet score for a release by one unit in their binding bound. Among the nutritional constraints, only the constraint limiting the decrease in the probability of adequacy for iron (as regards the SecDiet) in women was active. However, the effect of this constraint was limited; if the constraint was deleted, this probability dropped from 99% of its initial value to 98.7%, with a negligible PANDiet gain (+0.02) (data not shown). Several technological constraints were active (Table 3), the three most active being the upper bounds of herbs, spices and salt, oil-rich foods and nuts and seeds, with PANDiet increases between +0.10 and +0.24 per 1% increase in their upper binding bounds.

Table 3. Dual values associated with active technological constraints [a]

Constraint	Bounds of the constraint	Binding bound	Dual value
Herbs, spices and salt (group)	0-1%	Upper bound	2.4E-01
Oil-rich foods (group)	5-10%	Upper bound	1.6E-01
Nuts and seeds (sub-group)	0.5-5%	Upper bound	1.0E-01
Fragmented cereals, >10g/100g of protein (sub-group)	0-10%	Upper bound	4.6E-02
Vegetables and fruits, dried (sub-group)	0.5-5%	Upper bound	2.7E-02
Whole & fragmented cereals, <10g/100g of protein (sub-group)	5-15%	Lower bound	-2.1E-02
Cereals (group)	5-15%	Upper bound	1.5E-02
Vegetables and fruits (group)	5-20%	Upper bound	1.3E-02
Water content	50-65%	Lower bound	-4.7E-03

[a] Dual values represent the potential PANDiet gain for a relaxation by one unit of the binding bound of the constraint, i.e., for an absolute increase (decrease) of 1% in the upper (lower) binding bound of the constraint. Active constraints have a positive (negative) value if the upper (lower) bound is binding. Dual values of constraints not presented in this table are equal to zero.

Consistent with this, we determined whether releasing some or all of the technological constraints might have led to a markedly different composition of the optimized meat substitute (Supplementary Table S10). If the six constraints on pulses and cereals were released, the optimized meat substitute would contain broad bean instead of navy bean and at a lower proportion (28%), together with much more wheat germ (23%). However, cereals or pulses were not selected when releasing all the constraints on the ingredient groups, but only vegetables, oil-rich foods and herbs. If all technological constraints were released, the optimized meat substitutes would be difficult to formulate since it would contain mostly dried ingredients and oil (39% dried shiitake mushroom, 24% dried Chinese black mushroom, 14% rapeseed oil, 13% thyme, etc.).

Finally, while retaining all the initial technological constraints, we removed one by one each ingredient composing the optimized meat substitute presented in Table 1, as well as other ingredients in the database that were very similar (e.g., by concomitantly removing all sweet peppers when removing yellow sweet pepper) (Table 4). The proportions of ingredients generally varied but the main structure of the optimized meat substitute was mostly unchanged, since the ingredient removed was usually replaced by another ingredient from the same sub-group (e.g. navy bean was replaced with a mix of chick pea and blond lentil, or flaxseed was replaced with chia seed). For most ingredients, the replacement led to a PANDiet decrease compared to its value with the initial optimized meat substitute. This was mostly the case for rapeseed oil (-0.28), yellow sweet pepper (-0.23), all sweet peppers (-0.28), dried mushrooms (-0.20), wheat bran (-0.17) and thyme (-0.07). It was also apparent in the dual values calculated for eviction constraints, which were higher for these ingredients. For some ingredients, the impact on the PANDiet was low because there was a compensation between the loss of AS and the gain in MS. Replacement of chick pea, flaxseed and potato starch had the least impacts on PANDiet, AS and MS.

Table 4. Alternative compositions of the meat substitute when one ingredient of the optimized composition is removed and impacts on the PANDiet, AS and MS scores and on the dual values of the constraints

			Alternative composition when discarding an ingredient constituting the initial composition, by discarded ingredient [a, b]														
		Initial compo-sition	Navy bean	Chick pea	Yellow sweet pepper	All sweet peppers[c]	Dried shiitake	Dried mushrooms [d]	Wheat bran	Wheat germ	Couscous	Rapeseed oil	Sunflower oil	Flaxseed	Sweet potato	Potato starch	Thyme
Pulses	Navy bean, cooked	41.59		47.40	32.36	31.57	21.62	28.34	52.50	25.16	22.53	47.27	18.24	32.99	39.81	40.43	48.84
	Chick pea, cooked	5.77	32.06		12.64	14.38	25.43	18.34	-	21.56	24.01	-	29.43	13.51	9.99	7.48	-
	Lentil, blond, cooked	-	14.93	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vegetables, cooked	Pepper, sweet, yellow, cooked	15.00	15.00	15.00			15.00	19.50	13.40	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
	Sweet pepper, green, cooked	-	-	-	15.00		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Brussel sprouts, cooked	-	-	-	-	15.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Olives, black	-	-	-	-	-	-	-	1.60	-	-	-	-	-	-	-	-
Vegetables and fruits, dried	Shiitake mushroom, dried	5.00	5.00	5.00	3.27	2.38			4.39	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	3.52
	Chinese black mushroom, dried	-	-	-	1.73	2.62	5.00		0.61	-	-	-	-	-	-	-	1.48
	Chestnut, cooked	-	-	-	-	-	-	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fragmented cereals >10g/100g of protein	Wheat bran	5.63	10.00	4.53	10.00	10.00	10.00	10.00		10.00	10.00	7.30	10.00	10.00	5.92	6.33	10.00
	Wheat germ	4.37	-	5.47	-	-	-	-	10.00		-	2.70	-	-	4.08	3.67	-
Whole & fragmented cereals, <10g/100g of protein	Couscous, cooked, unsalted	5.00	0.60	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00		5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
	Durum wheat, cooked, unsalted	-	4.40	-	-	-	-	-	-	-	5.00	-	-	-	-	-	-
Vegetable oils	Rapeseed oil	3.60	4.33	3.47	3.64	3.74	3.95	3.80	3.83	3.87	3.94		4.63	3.57	3.70	3.64	3.34
	Sunflower oil	1.40	0.67	1.53	1.36	1.26	1.05	1.20	1.17	1.13	1.06	-		1.43	1.30	1.36	1.66
	Combined oil	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.00	0.37	-	-	-	-
Nuts and seeds	Flaxseed	5.00	5.00	5.00	1.74	3.67	2.31	3.48	4.67	2.68	3.23	-	5.00		5.00	5.00	5.00
	Seeds, chia, dried	-	-	-	3.26	1.33	2.69	1.52	-	2.32	1.77	5.00	-	5.00	-	-	-
	Fenugreek, seed	-	-	-	-	-	-	-	0.33	-	-	-	-	-	-	-	-
Tubers and garden peas	Sweet potato, cooked	2.74	2.01	2.80	4.15	4.49	3.09	2.32	1.00	2.95	2.96	2.84	2.16	3.21		2.49	1.70
	Yam or Indian potato, cooked	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	-
Starch	Potato starch	3.89	5.00	3.80	4.84	3.56	3.85	5.00	0.50	4.33	4.50	3.89	4.17	4.29	3.20		3.46
	Maize/corn starch	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.60	-
Herbs, spices and salt	Thyme, dried	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
	Basil, dried	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00
			Dual of the constraint: proportion (discarded ingredient)=0														
			0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.06	0.05	0.00	0.00	0.12	0.05	0.00	0.01	0.00	0.15
			Δ with the initial optimized meat substitute														
		Δ(PANDiet)	-0.06	0.00	-0.23	-0.28	-0.04	-0.20	-0.17	0.00	-0.01	-0.28	-0.03	0.00	-0.02	-0.01	-0.07
		Δ(AS)	-0.38	+0.04	-0.62	-0.79	-0.20	-0.27	-0.05	-0.09	-0.14	-0.36	-0.26	-0.01	-0.11	-0.05	-0.24
		Δ(MS)	+0.26	-0.04	+0.16	+0.24	+0.12	-0.12	-0.29	+0.09	+0.13	-0.19	+0.20	0.00	+0.07	+0.04	+0.11

[a] The crossed box indicates that the constraint of the proportion equal to zero was applied to this ingredient.
[b] Names of ingredients have been shortened for more clarity. The full names of ingredients can be found in Supplementary Table S2.
[c] Pepper, sweet, yellow, pan-fried, without fat; Sweet pepper, green, cooked; Sweet pepper, red, cooked.
[d] Shiitake mushroom, dried; Chinese black mushroom, dried

Discussion

In this study, we identified what would be the “best” composition for a plant-based meat substitute to improve the quality of the diet of French adults when completely substituting meat. The approach we used was original and innovative because it went beyond a simple comparison of the nutrient contents of the meat being replaced and considered the nutritional impact of the new food item on overall diet quality. Indeed, when considering the substitution of meat by another food, nutritional advantages depend on addressing all nutrient inadequacies, whether or not they are related to the removal of meat. We thus identified an optimal composition for a meat substitute that could be seen as a good lever to replace meat in the diet.

Indeed, the optimized meat substitute supplied some nutrients that are currently insufficiently consumed in the population, such as LA, ALA, fiber, folate and vitamin C, and it also enabled less excessive intakes of SFA and sodium, as had also been shown in several studies that simulated the substitution of meat with plant-based substitutes [23, 38, 39]. Indeed, a higher content of fiber, several minerals and polyunsaturated fatty acids has been found in plant-based substitutes than in meat [19, 20], but the optimized meat substitute proved to be much more efficient than existing meat substitutes. The benefits of meat substitutes might therefore be much greater if appropriate consideration were given to a large number of nutrients consumed insufficiently or in excess, and if the sourcing of a large number of ingredients were more finely tuned. These beneficial effects were also greater than those elicited by simply removing meat without providing a specific replacement.

In addition, the optimized meat substitute compensated totally or partially the loss of nutrients previously supplied by meat, and particularly potassium, vitamin B6, bioavailable iron and, to a lesser extent, bioavailable zinc. Except for potassium, the probabilities of adequacy for these nutrients still decreased with the optimized meat substitute, but less than if meat had simply been replaced by increases in the rest of the diet. The decrease was however still important for bioavailable zinc. The only exception was vitamin B12 where the optimized meat substitute had no effect on the probability of adequacy, which was not surprising because it was entirely plant-based and did not contain any vitamin B12. Zinc, iron and vitamin B12 are generally nutrients of concern when reducing meat consumption since meat, and animal-based foods in general, are important contributors of these nutrients [40]. We were however able to show that through the choice of appropriate ingredients, the iron content in the optimized meat substitute was sufficient to maintain adequacy, even with our fine assessment of iron bioavailability. The optimized meat substitute also supplied zinc, although the bioavailable amount was not sufficient to maintain the same probability of adequacy as in the observed diet.

Indeed, a previous study had showed that zinc and iron fortification was necessary when seeking to match the nutritional composition of beef, alongside vitamin B12 fortification to match that of beef and chicken [21]. In a study modeling diets using meat substitutes that were fortified or not with iron and vitamin B12, fortification was shown to allow a more efficient use in the context of meat reduction [22]. Therefore, fortifying meat substitutes could help to maintain adequate intakes of vitamin B12, zinc and iron. Some plant-based substitutes are indeed already fortified; for example, it has been reported in Australia that 24% of products are fortified with vitamin B12, 20%

with iron and 18% with zinc [19]. These nutrients could also be supplied by other foods of the diet, and diet optimization could help to target the consumption of appropriate food groups [22].

The optimized meat substitute might appear low in protein compared to meat or other meat substitutes on the market, but this was expected because we mainly used raw materials rather than the protein isolates that are usually used to produce a high protein content in meat substitutes [2, 18]. Moreover, the composition of the meat substitute resulted from the compromise made by an optimization procedure based on the current set of nutrient adequacies, and protein adequacy proved to be a secondary issue compared to other nutrients. We did not consider the amino acid composition of the optimized meat substitute, but there should be no issue in this respect since the protein sources comprised a mix of cereals, nuts and pulses that are known to have a complementary composition in amino acids [41]. Moreover, it has been shown that when protein intake is adequate, so is the intake of individual amino acids [42].

Along with the potential impacts on diet quality of meat substitutes, this study offers interesting perspectives in terms of their formulation and composition. We showed that some ingredients proved to offer interesting levers to improve the nutrient composition of meat substitutes, such as flax or chia seeds which are rich in ALA, black mushrooms which conveys B-vitamins and wheat germ and bran which are important sources of zinc and iron. By removing each ingredient successively from the optimized meat substitute, we found that the initial recipe was very robust inasmuch as it was not compromised by the removal of one ingredient. The gain in the PANDiet score offered by the optimized meat substitute was therefore the result of the complex assembly of its different ingredients supplying different nutrients at optimal proportions, as identified by our optimization approach.

One of our objectives was to model a meat substitute containing ingredients obtained by minimal processing steps. Indeed, most meat substitutes are ultra-processed (according to the NOVA classification [43]) and use ingredients that are refined, extracted and purified (e.g. protein isolates), additives, or involve processing techniques that enhance a meat-like fibrous texture, in order to mimic the texture, taste and flavor of meat [4, 5]. However, given the importance placed on naturalness by consumers [44] and concerns regarding the health effects of an excessive consumption of ultra-processed foods [24], we chose to limit the set of possible ingredients to those minimally processed. Our results have also implications in everyday practice as they show that simple ingredients can be used to formulate a meat substitute that would be very nutritionally efficient, and can be translated at home with simple recipes for plant-based patties.

The final recipe for the optimized meat substitute still contains quite a lot of ingredients but we have shown that they do not have the same nutritional importance, so some could be replaced or removed. Some ingredient groups were imposed for technological reasons rather than for their nutritional properties and experimental formulations could interestingly determine the extent to which these ingredients are indeed necessary at these proportions.

Indeed, one challenge of our study was to define the technological constraints necessary to produce a meat substitute that would look like a plant-based patty. As an *a posteriori* partial validation of these technological constraints, the recipe was reproduced at a kitchen scale and proved to be feasible, although a little dry and crumbly, with an excessively pronounced flavor of

thyme. Modifying some of the technological constraints would have increased the PANDiet gain (as shown by their dual values) and early tests showed us that with a ±5% change in the upper or lower bounds of some constraints, the same ingredients were almost always chosen (data not shown). Therefore, the composition and proportions of ingredients described here might vary as a function of technological issues.

Our study had certain limitations. First, optimization was performed on an average individual, which led to a somewhat crude evaluation of diet quality, since the variability of intake was not taken into account. We believe that the impact of substitution is better evaluated at an individual level rather than a population level because this takes more account of the heterogeneity of diets [45], but our objective was to model a unique substitute that would best improve general diet quality and not to find a personalized meat substitute for each individual. But we have shown that replacing meat with the optimized meat substitute at the individual level led to similar conclusions, although differences with observed diets were less marked. Further, the database of ingredients was limited to those for which we had a complete nutritional composition, so despite our considerable database (159 ingredients) we did not have an exhaustive list of potential ingredients. While we tried to best describe the technological constraints associated with the formulation of a plant-based patty, we might not have been sufficiently accurate and some constraints might not have been fully taken into account.

In conclusion, we have shown that it is possible to identify the composition of a meat substitute that would offer the best nutritional lever to replace meat. As revealed by optimization on a large set of nutrient adequacy, the optimized meat substitute could improve diet quality by both increasing nutrient adequacy for nutrients not provided by meat and by compensating for most of the nutrients conveyed by meat. Meat substitutes with an appropriate composition could therefore be adapted nutritionally to replace meat.

References

1. Kumar P, Chatli MK, Mehta N, et al (2017) Meat analogues: Health promising sustainable meat substitutes. Crit Rev Food Sci Nutr 57:923–932. https://doi.org/10.1080/10408398.2014.939739

2. Sadler MJ (2004) Meat alternatives — market developments and health benefits. Trends in Food Science & Technology 15:250–260. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.09.003

3. Malav OP, Talukder S, Gokulakrishnan P, Chand S (2015) Meat Analog: A Review. Crit Rev Food Sci Nutr 55:1241–1245. https://doi.org/10.1080/10408398.2012.689381

4. Bohrer BM (2019) An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products. Food Sci Hum Wellness 8:320–329

5. Choudhury D, Singh S, Seah JSH, et al (2020) Commercialization of Plant-Based Meat Alternatives. Trends in Plant Science 25:1055–1058. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.08.006

6. Godfray HCJ, Aveyard P, Garnett T, et al (2018) Meat consumption, health, and the environment. Science 361:eaam5324. https://doi.org/10.1126/science.aam5324

7. Willett W, Rockström J, Loken B, et al (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Lancet 393:447–492. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4

8. McMichael AJ, Powles JW, Butler CD, Uauy R (2007) Food, livestock production, energy, climate change, and health. Lancet 370:1253–1263. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(07)61256-2

9. Schösler H, Boer J de, Boersema JJ (2012) Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution. Appetite 58:39–47. https://doi.org/10.1016/j.appet.2011.09.009

10. Macdiarmid JI, Douglas F, Campbell J (2016) Eating like there's no tomorrow: Public awareness of the environmental impact of food and reluctance to eat less meat as part of a sustainable diet. Appetite 96:487–493. https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.10.011

11. Weinrich R (2018) Cross-Cultural Comparison between German, French and Dutch Consumer Preferences for Meat Substitutes. Sustainability 10:1819

12. Pereira PM de CC, Vicente AF dos RB (2013) Meat nutritional composition and nutritive role in the human diet. Meat Science 93:586–592. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.09.018

13. Bohrer BM (2017) Review: Nutrient density and nutritional value of meat products and non-meat foods high in protein. Trends Food Sci Technol 63:103–112

14. Cocking C, Walton J, Kehoe L, et al (2020) The role of meat in the European diet: current state of knowledge on dietary recommendations, intakes and contribution to energy and nutrient intakes and status. Nutr Res Rev 33:1–9

15. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F (2018) Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. Nutrients 10:226. https://doi.org/10.3390/nu10020226

16. Reynolds CJ, Horgan GW, Whybrow S, Macdiarmid JI (2019) Healthy and sustainable diets that meet greenhouse gas emission reduction targets and are affordable for different income groups in the UK. Public Health Nutr 22:1503–1517

17. Perignon M, Masset G, Ferrari G, et al (2016) How low can dietary greenhouse gas emissions be reduced without impairing nutritional adequacy, affordability and acceptability of the diet? A modelling study to guide sustainable food choices. Public Health Nutr 19:2662–2674. https://doi.org/10.1017/S1368980016000653

18. Boukid F (2020) Plant-based meat analogues: from niche to mainstream. Eur Food Res Technol 1–12. https://doi.org/10.1007/s00217-020-03630-9

19. Curtain F, Grafenauer S (2019) Plant-Based Meat Substitutes in the Flexitarian Age: An Audit of Products on Supermarket Shelves. Nutrients 11:2603. https://doi.org/10.3390/nu11112603

20. De Marchi M, Costa A, Pozza M, et al (2021) Detailed characterization of plant-based burgers. Sci Rep 11:2049. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81684-9

21. Van Mierlo K, Rohmer S, Gerdessen JC (2017) A model for composing meat replacers: Reducing the environmental impact of our food consumption pattern while retaining its nutritional value. J Clean Prod 165:930–950. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.098

22. Mertens E, Biesbroek S, Dofková M, et al (2020) Potential Impact of Meat Replacers on Nutrient Quality and Greenhouse Gas Emissions of Diets in Four European Countries. Sustainability 12:6838. https://doi.org/10.3390/su12176838

23. Salomé M, Huneau J-F, Le Baron C, et al (2021) Substituting Meat or Dairy Products with Plant-Based Substitutes Has Small and Heterogeneous Effects on Diet Quality and Nutrient Security: A Simulation Study in French Adults (INCA3). J Nutr nxab146. https://doi.org/10.1093/jn/nxab146

24. Monteiro CA, Cannon G, Lawrence M, et al (2019) Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system. FAO, Rome

25. Dubuisson C, Dufour A, Carrillo S, et al (2019) The Third French Individual and National Food Consumption (INCA3) Survey 2014–2015: method, design and participation rate in the framework of a European harmonization process. Public Health Nutr 22:584–600. https://doi.org/10.1017/S1368980018002896

26. Henry C (2005) Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. Public Health Nutr 8:1133–1152. https://doi.org/10.1079/PHN2005801

27. Black A (2000) Critical evaluation of energy intake using the Goldberg cut-off for energy intake:basal metabolic rate. A practical guide to its calculation, use and limitations. Int J Obes 24:1119–1130. https://doi.org/10.1038/sj.ijo.0801376

28. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (2016) ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016

29. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, et al (2012) Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. PLoS ONE 7:e42155. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042155

30. Anses (2021) AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « Actualisation des références nutritionnelles françaises en vitamines et minéraux » ; saisine n°2018-SA-0238. Saisine liée n°2012-SA-0103.

31. Hallberg L, Hulthén L (2000) Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. Am J Clin Nutr 71:1147–1160. https://doi.org/10.1093/ajcn/71.5.1147

32. Armah SM, Carriquiry A, Sullivan D, et al (2013) A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults. J Nutr 143:1136–1140. https://doi.org/10.3945/jn.112.169904

33. Miller LV, Krebs NF, Hambidge KM (2007) A Mathematical Model of Zinc Absorption in Humans As a Function of Dietary Zinc and Phytate. J Nutr 137:135–141. https://doi.org/10.1093/jn/137.1.135

34. Salomé M, Kesse-Guyot E, Fouillet H, et al (2020) Development and evaluation of a new dietary index assessing nutrient security by aggregating probabilistic estimates of the risk of nutrient deficiency in two French adult populations. Br J Nutr 1–34. https://doi.org/10.1017/S0007114520005115

35. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (2020) ANSES-CIQUAL French food composition table version 2020

36. Vásquez-Caicedo AL, Bell S, Hartmann B (2008) Report on collection of rules on use of recipe calculation procedures including the use of yield and retention factors for imputing nutrient values for composite foods. EuroFIR

37. Etude NutriNet-Santé (2013) Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database). Economica, Paris

38. Seves SM, Verkaik-Kloosterman J, Biesbroek S, Temme EH (2017) Are more environmentally sustainable diets with less meat and dairy nutritionally adequate? Public Health Nutr 20:2050–2062. https://doi.org/10.1017/S1368980017000763

39. Temme EH, van der Voet H, Thissen JT, et al (2013) Replacement of meat and dairy by plant-derived foods: estimated effects on land use, iron and SFA intakes in young Dutch adult females. Public Health Nutr 16:1900–1907. https://doi.org/10.1017/S1368980013000232

40. Phillips SM, Fulgoni VL, Heaney RP, et al (2015) Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. Am J Clin Nutr 101:1346S-1352S. https://doi.org/10.3945/ajcn.114.084079

41. Mariotti F (2017) Plant Protein, Animal Protein, and Protein Quality. In: Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention. Elsevier, pp 621–642

42. de Gavelle E, Huneau J-F, Bianchi C, et al (2017) Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults. Nutrients 9:1333. https://doi.org/10.3390/nu9121333

43. Monteiro CA, Cannon G, Levy R, et al (2016) NOVA. The star shines bright. World Nutrition 7:28–38

44. Román S, Sánchez-Siles LM, Siegrist M (2017) The importance of food naturalness for consumers: Results of a systematic review. Trends in Food Science & Technology 67:44–57. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.010

45. de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F (2019) The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. J Nutr 149:488–496. https://doi.org/10.1093/jn/nxy275

Supplementary data

European Journal of Nutrition

The potential effects of meat substitution on diet quality could be high if meat substitutes are optimized for nutritional composition – a modeling study in French adults (INCA3).

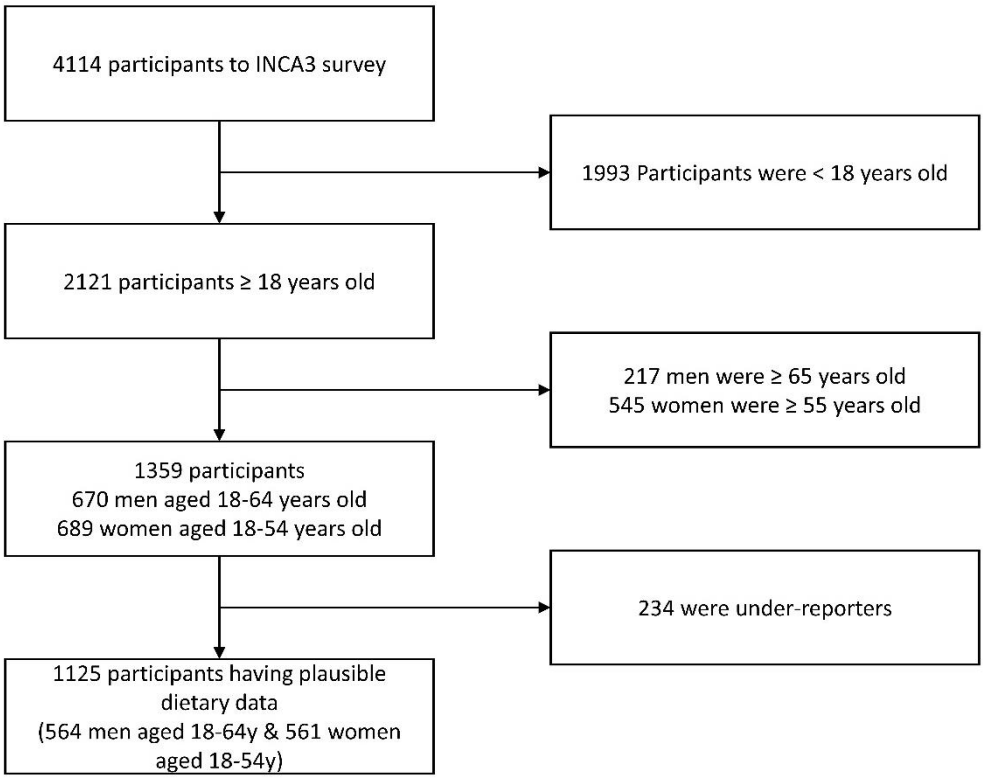
Marion Salomé[1], François Mariotti[1], Marie-Charlotte Nicaud[2], Alison Dussiot[1], Emmanuelle Kesse-Guyot[3], Marie-Noëlle Maillard[2], Jean-François Huneau[1], Hélène Fouillet[1].

[1]Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France

[2]Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech, UMR SayFood, 91300 Massy, France

[3] Sorbonne Paris Nord University, INSERM U1153, INRAe U1125, CNAM, Nutritional Epidemiology Research Team (EREN), Epidemiology and Statistics Research Center – University of Paris (CRESS), Bobigny, France

Corresponding author: François Mariotti, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France
francois.mariotti@agroparistech.fr



Supplementary Figure S1 Flow chart explaining the sampling of French participants from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3) for the present study.

Supplementary Table S1 Meat food items identified in INCA3 diets as substitutable by a plant-based meat substitute in modeled scenarios.

Meat food items (n=166)		
Beef, lamb and horse meat food items (n=93)		
Beef on skewer	Beef, tournedos, Rossini-style	Meat balls, pork and beef, (Swedish-style), prepacked
Beef stew with carrots	Brain, lamb, cooked	Meat, cooked (average)
Beef tongue with Madeira wine sauce, prepacked	Burgundy-style beef stew	Merguez sausage, beef and mutton, cooked
Beef, bolar-blade, grilled/pan-fried	Caen-style tripe	Mixed meat on skewer
Beef, braised	Caen-style tripe, prepacked	Ox muzzle
Beef, cheek, braised or boiled	Calf, head, boiled/cooked in water	Pheasant, meat, roasted/baked
Beef, chuck, braised or boiled	Feathered game, meat, cooked (average)	Provencal-type tripe (with tomato)
Beef, flank steak, grilled/pan-fried	Heart, beef, cooked	Red meat, cooked (average)
Beef, ground, cooked (average)	Horse, meat, raw	Sauté of lamb w curry, prepacked
Beef, hanger steak, grilled	Horse, meat, roasted/baked	Stewed lamb garnished with potatoes and other vegetables
Beef, knuckle, boiled/cooked in water	Horse, rib steak, grilled/pan-fried	Sweetbread, calf, sautéed/pan-fried
Beef, meat balls, cooked	Horse, topside, grilled/pan-fried	Tongue, beef, cooked
Beef, minced steak, 10% fat, cooked	Kidney, beef, cooked	Veal fillet, roasted/baked
Beef, minced steak, 15% fat, cooked	Kidney, lamb, braised	Veal olive or veal paupiette
Beef, minced steak, 15% fat, raw	Kidney, veal, sautéed/pan-fried	Veal stew in white sauce
Beef, minced steak, 20% fat, cooked	Lamb on skewer	Veal, breast, raw
Beef, minced steak, 20% fat, raw	Lamb, chop fillet, grilled/pan-fried	Veal, chop, grilled/pan-fried
Beef, minced steak, 5% fat, cooked	Lamb, chop, grilled (average)	Veal, escalope, cooked
Beef, minced steak, 5% fat, raw	Lamb, leg, braised	Veal, knuckle or shank, braised or boiled
Beef, oxtail, boiled/cooked in water	Lamb, leg, grilled/pan-fried	Veal, loin, sautéed/pan-fried
Beef, rib steak, lean, grilled/pan-fried	Lamb, leg, roasted/baked	Veal, meat, cooked (average)
Beef, roast beef, roasted/baked	Lamb, meat, cooked (average)	Veal, minced steak, 15% fat, raw
Beef, round, cooked	Lamb, neck, braised or boiled	Veal, neck, braised or boiled
Beef, rump steak, grilled	Lamb, saddle, grilled/pan-fried	Veal, roast, cooked
Beef, short ribs, braised	Lamb, saddle, lean, roasted/baked	Veal, shoulder, braised/boiled
Beef, sirloin steak, grilled/pan-fried	Lamb, shoulder, lean, roasted/baked	Veal, shoulder, grilled/pan-fried
Beef, sirloin steak, roasted/baked	Lamb, shoulder, roasted/baked	Veal, tenderloin, grilled/pan-fried
Beef, steak or beef steak, grilled	Liver, calf, cooked	Veal, tenderloin, roasted
Beef, steak or beef steak, raw	Liver, lamb, cooked	Venison (hart), roasted/baked
Beef, stewing meat, cooked	Liver, young cow, cooked	Venison (roebuck), roasted/baked
Beef, thin flank, grilled/pan-fried	Meat balls, beef and lamb (kefta type), prepacked, raw	Wild boar, roasted/baked
Poultry meat food items (n=39)		
Capon, meat and skin, roasted/baked	Heart, chicken, cooked	
Chicken leg, meat, boiled/cooked in water	Liver, chicken, cooked	
Chicken leg, meat, roasted/baked	Milanese-style turkey escalope or breaded veal escalope	
Chicken with curry and coconut milk sauce	Pigeon, meat, roasted/baked	
Chicken, Basque style, prepacked	Poultry on skewer	
Chicken, breast, without skin, cooked	Poultry paupiette	
Chicken, leg, meat and skin, boiled/cooked in water	Poultry sausage	
Chicken, leg, meat and skin, roasted/baked	Poultry sausage, delicatessen style	
Chicken, marinated wing, roasted/baked	Poultry, cooked (average)	
Chicken, meat and skin, roasted/baked	Preserved duck	
Chicken, wing, meat and skin, roasted/baked	Preserved gizzards, duck, canned	
Cockerel in red wine sauce	Quail, meat and skin, cooked	
Duck breast fillet, smoked	Rabbit with mustard sauce, prepacked	
Duck with sauce (green pepper sauce, hunter-style sauce, etc.), prepacked	Rabbit, meat, braised	
	Rabbit, meat, cooked	
Duck, breast, cooked in pan	Rabbit, wild, meat, cooked	
Duck, breast, Rossini-style	Turkey, escalope, sautéed/pan-fried, with salt	
Duck, meat and skin, roasted/baked	Turkey, leg, meat only, raw	
Duck, meat, roasted/baked	Turkey, meat, roasted/baked	
Guinea fowl, raw	white meat, cooked (average)	
Pork meat food items (n=34)		
Black or white pudding (blood sausage), sautéed (average)	Pork with caramel sauce, prepacked	
Black pudding (blood sausage), sautéed/pan-fried	Pork, belly, raw	
Chipolata sausage, cooked	Pork, chop, grilled	
Chitterling sausage, raw	Pork, knuckle or shank, raw	
Devilled pork shoulder in mustard sauce, prepacked	Pork, loin, roasted/baked	
Frankfurter sausage	Pork, meat, cooked (average)	
Kidney, pork, cooked	Pork, rack, cooked	
Liver sausage	Pork, roast, cooked	
Liver, pork, cooked	Pork, round steak, cooked	
Montbeliard sausage	Pork, shoulder, cooked	
Morteau sausage	Pork, spare-ribs, braised	
Morteau sausage, boiled/cooked in water	Sausage (average)	
Pork belly, smoked, raw	Saveloy or cervelat	
Pork filet mignon, cooked	Smoked Alsatian sausage or Landjäger	
Pork loin, cooked	Strasbourg sausage	
Pork tenderloin roast, cooked	Toulouse sausage, cooked	
Pork trotters salt-cured		

Supplementary Table S2 Reference values of the PANDiet scoring system version 3.2 [1, 2].

PANDiet score
Average of Adequacy and Moderation sub-scores

Adequacy sub-score		
Nutrient	**Reference value (/day)[3]**	**Variability**
Protein	0.66 or 0.8 g/kg bw	12.5%
LA	3.08% EIEA	15%
ALA	0.769% EIEA	15%
DHA	0.192 g	15%
EPA + DHA	0.385 g	15%
Fiber	23 g	15%
Vitamin A	580 or 490 µg	15%
Thiamin	0.3 mg/1000 kcal	20%
Riboflavin	1.3 mg	10%
Niacin	5.44 mg NE/1000kcal	10%
Pantothenic acid	3.33 or 2.78 mg	40%
Vitamin B-6	1.5 or 1.3 mg	10%
Folate	250 µg	15%
Vitamin B-12	3.33 µg	10%
Vitamin C	90 mg	10%
Vitamin D	10 µg	25%
Vitamin E	5.26 or 4.74 mg	45%
Calcium	860 (<= 24 y.o) or 750 mg (>24 y.o.)	15% or 13%
Copper	0.86 or 0.68 mg	60%
Iodine	107 µg	20%
Bioavailable iron [a]	0.95 mg	40%
Magnesium	224 or 176 mg	35%
Manganese	1.89 or 1.56 mg	40%
Phosphorus [b]	Calcium (mmol) / 1.65	7.5% + CV Calcium (mg)
Potassium	2692 mg	15%
Selenium	54 µg	15%
Bioavailable zinc [c]	0.642 + 0.038 x bw	10%

Moderation sub-score		
Nutrient	**Reference value (/day)[3]**	**Variability**
Protein	2.2 g/kg bw	12.5%
Total fat	44% EIEA	5%
SFA	12% EIEA	15%
Carbohydrates	60.5% EIEA	5%
Sugars	100 g	15%
Sodium	3200 mg	15%

Tolerable Upper Intake Limits [d]	
Vitamin A	3000 µg
Niacin	900 mg
Vitamin B-6	25 mg
Vitamin D	100 µg
Calcium	2500 mg
Copper	5 mg
Iodine	600 µg
Selenium	300 µg
Zinc	25 mg

[a] See supplemental method 1 in de Gavelle et al. [4] for the calculation of bioavailable iron and requirements for women. Iron requirements for women were adapted to consider women with normal and high requirements [3].
[b] See supplemental method 1 in de Gavelle et al. [4]
[c] See Supplemental file in Salomé et al. [2] for the calculation of bioavailable zinc.
[d] Penalty are usually applied when intakes of some nutrients are higher than tolerable upper intake limits in the calculation of the PANDiet [1]. Here, when calculating the PANDiet at the average individual level, penalties were not taken into account but tolerable upper intake limits where defined as upper bound constraints in the optimization procedure.
ALA, alpha-linolenic acid; bw, body weight; CV, coefficient of variation; DHA, docosahexaenoic acid; EIEA, energy intake excluding alcohol; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid; NE, niacin equivalent; SFA, saturated fatty acids.

Supplementary Table S3 Nutrients included as components in the SecDiet score and associated deficiency and threshold values.

Nutrients were included in the SecDiet score if clinical signs of deficiency might appear because of insufficient intakes. The threshold value (DT) was defined as the minimal intake below which there is a risk of onset of a deficiency. The reference value was used to calculate the probability of adequacy of the average deficiency threshold (aDT), which corresponds to the intake at which 50% of the population is at risk of nutritional deficiency. The complete construction of the score has been fully described elsewhere [5].

Nutrient	Deficiency	Threshold (DT)	CV	50% of risk (aDT)
Vitamin A[6]	Xerophtalmia	300 µg RE or 270 µg RE	15%	231 µg RE or 208 µg RE
Thiamin[7]	Beriberi	0.18 mg/1000kcal	20%	0.13 mg/1000kcal
Riboflavin[7]	Ariboflavinosis	1.0 mg	10%	0.83 mg
Niacin[7]	Pellagra	4.35 mg NE/1000kcal	10%	3.63 NE/1000kcal
Folate[7]	Megaloblastic anemia	175 µg	15%	135 µg
Vitamin B-12[8]	Megaloblastic anemia	1 µg	15%	0.77 µg
Vitamin C[6]	Scurvy	10 mg	10%	8.3 mg
Iodine [a] [7]	Goiter	129 µg	20%	92.4 µg
Selenium[9]	Keshan disease	21 µg or 16 µg	15%	16.2 µg or 12.3 µg
Bioavailable iron [a] [10]	Anemia	0.83 or 1.08 mg	40%	0.45 or 0.55 mg
Bioavailable zinc[11]	Zinc deficiency	1.6 mg or 1.3 mg	15%	1.23mg or 1.0 mg
Calcium[12–14]	Fracture risk (long-term)	500 mg	15%	385 mg

DT, deficiency threshold; CV, coefficient of variation of the individual threshold; aDT, average deficiency threshold; RE, retinol equivalent; NE, niacin equivalent.

[a] These thresholds were calibrated in order to match the prevalence of inadequacy with the actual prevalence of goiter (10%)[15] and iron-deficiency anemia in the population (0.2% in men, 3.9% in women)[16]. The prevalence of inadequacy of the study population was estimated using the Nusser method [17], to extract intra-individual variations and using a probabilistic approach [18].

Supplementary Table S4 Classification of ingredients available for composition of the meat substitute. Ingredients were categorized in groups and sub-groups according to their nutritional or technological properties.

Pulses	Vegetables and fruits			Herbs, spices and salt
	Vegetables, cooked		Vegetables and fruits, dried	
Source of protein and fiber *Texturizing and emulsifying ingredients*	*Source of fiber, vitamins and minerals*			*Taste enhancer*
Broad bean, boiled/cooked in water Chick pea, boiled/cooked in water Navy bean, boiled/cooked in water Flageolet bean, boiled/cooked in water Flageolet bean, green, boiled/cooked in water Haricot bean, boiled/cooked in water Lentil, blond, boiled/cooked in water Lentil, green, boiled/cooked in water Lentil, pink or red, boiled/cooked in water Mung bean, boiled/cooked in water Red kidney bean, boiled/cooked in water Split pea, boiled/cooked in water	Artichoke, globe, cooked Beetroot, cooked Broccoli, cooked Brussels sprout, cooked Butter bean or yellow bean, boiled/cooked in water Button mushroom or cultivated mushroom, boiled/cooked in water Carrot, cooked Cauliflower, cooked Celeriac, cooked Celery stalk, cooked Chinese cabbage (nappa cabbage or bok choy), cooked Courgette or zucchini, pulp and peel, cooked Eggplant, cooked Fennel, boiled/cooked in water French bean, cooked Green cabbage, cooked Kohlrabi, boiled/cooked in water Leek, cooked Okra, cooked, without salt Olives, black, in brine Olives, green, in brine Onion, cooked	Parsnip, cooked Pepper, sweet, yellow, pan-fried, without fat Pumpkin (cucurbita moschata), pulp, cooked Pumpkin, cooked Red cabbage, boiled/cooked in water Red kuri squash, pulp, boiled/cooked in water Romanesco cauliflower or romanesco broccoli, cooked Rutabaga or Swede, cooked Salsify, cooked Shallot, cooked Shiitake mushroom, cooked Snow pea, cooked Spinach, cooked Squash, butternut, peeled, cooked Sweet corn, canned, drained Sweet pepper, green, cooked Sweet pepper, red, cooked Swiss chard, cooked Tomato paste, concentrated, canned Tomato, peeled, canned, drained Turnip, cooked White cabbage, boiled/cooked in water	Apricot, pitted, dried Chestnut, boiled/cooked in water Chinese black mushroom, dried Cranberry, dried, with sugar Date, pulp and peel, dried Fig, dried Onion, dried Prune Raisin Shiitake mushroom, dried Tomato, dried	Basil, dried Black pepper, powder Cardamom, powder Cloves Coriander, seed Cumin, seed Curry, powder Garlic, powder, dried Ginger, powder Laver (Porphyra sp.), dried or dehydrated Mint, dried Nutmeg Oregano, dried Paprika Parsley, dried Provence herbs, dried Rosemary, dried Saffron Sage, dried Salt, white (sea, igneous or rock), iodine added, no other enrichment Thyme, dried Turmeric, powder

Cereals				
Flours, >10g/100g of protein	**Flours, <10g/100g of protein**	**Fragmented cereals, >10g/100g of protein**	**Whole cereals**	**Fragmented cereals, <10g/100g of protein**
Source of carbohydrates, protein and fiber *Plasto-elastic properties*		*Source of carbohydrates, protein and fiber*	*Source of carbohydrates, protein and fiber* *Contributors of a persistent texture in mouth*	
Buckwheat flour Millet flour Spelt flour Wheat flour, type 150	Barley flour Chestnut flour Maize/corn flour Rice flour Rye flour, type 130 Wheat flour, type 110 Wheat flour, type 55 (for bread)	Breadcrumbs Oat bran Oatmeal flakes Wheat bran Wheat germ	Durum wheat pre-cooked, whole grain, cooked, unsalted Millet, cooked, unsalted Quinoa, boiled/cooked in water, unsalted Rice, brown, cooked, unsalted Rice, cooked, unsalted Rice, red, cooked, unsalted Wild rice, cooked, unsalted	Couscous (precooked durum wheat semolina), cooked, unsalted Frik (crushed immature durum wheat), cooked, unsalted Pearled barley, boiled/cooked in water, unsalted Polenta or maize semolina, cooked, unsalted Semolina, cooked Wheat bulgur, cooked, unsalted

Supplementary Table S4 (continued) Classification of ingredients available for composition of the meat substitute. Ingredients were categorized in groups and sub-groups according to their nutritional or technological properties.

Oil-rich foods			**Tubers and starch**	
Vegetable oils	**Nuts/seeds paste**	**Nuts and seeds**	**Tubers and garden peas**	**Starch**
Source of lipids *Contributors of a soft texture*		*Source of lipids* *Contributors of a crunchy texture*	*Source of carbohydrates* *Thickening and binding ingredients*	
Avocado oil Combined oil (blended vegetable oils) Grapeseed oil Hazelnut oil Linseed oil Olive oil, extra virgin Peanut oil Rapeseed oil Sunflower oil Walnut oil	Peanut butter or peanut paste Tahini (sesame paste)	Almond, (with peel) Almond, peeled, unpeeled or blanched Brazil nut Cashew nut, grilled, unsalted Coconut, kernel, dried Cucurbitacea, seed Fennel, seed Fenugreek, seed Flaxseed Hazelnut Macadamia nut Peanut Pecan nut Pine nuts Pistachio nut, grilled Poppy, seed Seeds, chia, dried Sesame seed Sunflower seed Walnut, dried, husked	Cassava or manioc, roots, cooked Garden peas, cooked Jerusalem artichoke, cooked Potato, boiled/cooked in water Sweet potato, cooked Taro, tuber, cooked Yam or Indian potato, peeled, boiled/cooked in water	Maize/corn starch Potato starch

Supplementary Table S5 Technological constraints applied during optimization of the meat substitute: ingredient categories and proportions.

Ingredient groups and sub-groups		Proportion range	
Pulses		40-60%	
Vegetables and fruits	Vegetables, cooked	5-20%	5-20%
	Vegetables and fruits, dried		0.5-5%
Cereals	Flours, >10g/100g of protein	5-15%	0-5%
	Flours, <10g/100g of protein		0-10%
	Fragmented cereals, >10g/100g of protein		0-10%
	Whole & fragmented cereals, <10g/100g of protein		5-15%
Oil-rich foods	Vegetable oils	5-10%	5-10%
	Nuts and seeds		0.5-5%
	Nuts/seeds paste		no constraint
Tubers and starch	Tubers and garden peas	1-10%	1-10%
	Starch		0.5-5%
Herbs, spices and salt		0-1%	

Supplementary Table S6 List of existing meat substitutes used for modeled diets.

Substitute name	Data-base of origin[1]
Tofu, plain	[19]
Tempeh	[19]
Soy protein, textured, rehydrated	[19]
Soy burger or vegetable escalope	[20]
Cereal burger with cheese (without soybean)	[19]
Cereal burger with vegetables (without soybean)	[19]
Plant-based burger or steak from wheat (seitan) and vegetables	[19]
Plant-based burger or steak from lentil, soybean and vegetables	[19]
Plant-based burger from red kidney bean	[21]
Plant-based burger from lentil	[21]
Plant-based burger or steak from soybean and cheese	[19]
Plant-based burger or steak from soybean and vegetables	[19]
Plant-based burger or steak from soybean, cheese and vegetables	[19]
Plant-based burger from soybean	[21]
Plant-based burger from soybean with curry #1	[21]
Plant-based burger from soybean with curry #2	[21]
Plant-based burger from soybean with tomatoes and sweet pepper #1	[21]
Plant-based burger from soybean with tomatoes and sweet pepper #2	[21]
Plant-based burger from soybean with herbs #1	[21]
Plant-based burger from soybean with herbs #2	[21]
Plant-based burger from soybean with vegetables #1	[21]
Plant-based burger from soybean with vegetables #2	[21]
Plant-based burger from soybean with tomatoes and basil #1	[21]
Plant-based burger from soybean with tomatoes and basil #2	[21]
Plant-based burger or steak from wheat and soybean (vegan)	[19]
Plant-based burger or steak from wheat and soybean (not vegan)	[19]
Plant-based burger from cereals and soybean	[21]
Plant-based sausage with wheat or seitan	[19]
Plant-based sausage with wheat	[21]
Plant-based sausage with tofu (vegan)	[19]
Plant-based sausage with tofu (not vegan)	[19]
Plant-based sausage with tofu	[21]
Falafel	[20]
Falafel, prepacked	[19]
Soy and wheat burger or bite (vegan)	[19]
Soy and wheat burger or bite (not vegan)	[19]
Plant-based ball with wheat and/or soybean	[19]
Wheat-based nuggets (wo soybean)	[19]
Soybean and wheat-based nuggets (not vegan)	[19]
Soybean and wheat-based nuggets (vegan)	[19]
Schnitzel, soybean and wheat-based (not vegan)	[19]
Schnitzel, soybean and wheat-based (vegan)	[19]
Schnitzel, soybean, wheat and cheese-based, cordon bleu-style	[19]

[1]Three nutritional composition databases were used: CIQUAL French composition table version 2016 [20], version 2020 [19] and the NutriNet-Santé Study Food composition database [21]

Supplementary Table S7 Nutritional composition per 100g of the optimized meat substitute and contribution of each ingredient to its nutrient content.

	Weight (g)	Energy (kcal)	Water (g)	Protein (g)	Carbo-hydrate (g)	Fat (g)	Sugars (g)	Fiber (g)	SFA (g)	LA (g)	ALA (g)	Calcium (mg)	Copper (mg)	Iron (mg)	Iodine (µg)	Magne-sium (g)
Nutrient content (per 100g)	**100**	**211**	**50.0**	**8.5**	**19.4**	**8.1**	**2.3**	**13.0**	**0.9**	**2.3**	**1.2**	**75.3**	**0.6**	**4.4**	**7.7**	**97.1**
Contribution of each ingredient to nutrient content (%)																
Navy bean, boiled/cooked in water	41.6[a]	**25.8**	**51.0**	**46.9**	**29.3**	2.6	**20.0**	**50.6**	5.3	2.2	**5.4**	**39.8**	**19.0**	**25.7**	**53.8**	**22.7**
Pepper, sweet, yellow, pan-fried, without fat	15.0	2.5	**27.2**	1.8	4.1	1.1	**32.1**	2.5	3.3	1.3	1.2	1.5	1.6	0.8	**19.4**	1.7
Chick pea, boiled/cooked in water	5.8	4.0	**7.2**	5.6	5.3	2.1	0.8	3.6	3.1	3.8	0.4	5.5	2.4	1.7	**7.5**	2.6
Wheat bran	5.6	7.4	1.0	10.1	6.8	3.0	6.0	**18.2**	5.5	5.8	0.7	5.5	10.4	**19.0**	1.7	**31.6**
Flaxseed	5.0	**11.6**	0.6	**11.8**	1.7	**22.5**	3.4	**10.5**	**18.5**	9.5	**67.5**	**15.1**	**10.7**	11.7	0.3	**19.2**
Couscous (precooked durum wheat semolina), cooked, unsalted	5.0	3.7	6.1	2.7	8.0	0.6	3.5	0.9	1.5	0.9	0.1	1.0	1.4	0.6	6.5	1.0
Shiitake mushroom, dried	5.0	7.5	0.9	5.6	**16.5**	0.6	4.8	4.4	1.3	0.3	0.0	0.7	**45.5**	2.0	0.0	6.8
Wheat germ	4.4	7.6	0.7	**13.9**	7.9	5.1	**19.1**	5.5	9.3	**9.8**	2.3	3.1	6.0	8.9	5.7	11.3
Potato starch	3.9	6.4	1.0	0.0	**17.3**	0.1	2.2	0.2	0.2	0.1	0.2	1.4	0.7	0.7	0.2	0.2
Rapeseed oil	3.6	**15.3**	0.0	0.0	0.0	**44.2**	0.0	0.0	**30.5**	**31.0**	**22.0**	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
Sweet potato, cooked	2.7	0.8	4.3	0.5	1.7	0.1	7.3	0.6	0.1	0.0	0.0	1.2	0.6	0.4	1.1	0.6
Sunflower oil	1.4	6.0	0.0	0.0	0.0	**17.1**	0.0	0.0	**18.1**	**34.9**	0.1	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0
Thyme, dried	1.0	1.3	0.2	1.1	1.4	0.9	0.7	2.9	3.2	0.4	0.3	**25.1**	1.5	**28.4**	1.9	2.3

[a] Values are percentages calculated from the quantity of nutrient provided by the ingredient in the optimized meat substitute divided by the total nutrient content in the optimized meat substitute. Bold values represent the 3 main ingredients contributing to the content of each nutrient (e.g. navy bean, rapeseed oil and flaxseed are the three main contributors of energy in the optimized meat substitute). Vitamin B12 content is not presented as the optimized meat substitute is entirely plant-based and did not contain any vitamin B12.
ALA, alpha-linolenic acid; LA, linoleic acid.

Supplementary Table S7 (continued) Nutritional composition per 100g of the optimized meat substitute and contribution of each ingredient to its nutrient content.

	Manga-nese (g)	Phos-phorus (g)	Potas-sium (g)	Sele-nium (g)	Sodium (mg)	Zinc (mg)	Vitamin A (µg)	Thiamin (mg)	Ribo-flavin (mg)	Niacin (mg)	Panto-thenic acid (mg)	Vitamin B6 (mg)	Folate (µg)	Vitamin C (mg)	Vitamin D (µg)	Vitamin E (mg)
Nutrient content (per 100g)	**2.1**	**241**	**490**	**9.7**	**9.3**	**2.4**	**37.1**	**0.3**	**0.1**	**2.7**	**1.5**	**0.3**	**75.1**	**20.8**	**0.3**	**2.9**
Contribution of each ingredient to nutrient content (%)																
Navy bean, boiled/cooked in water	**11.7**	**31.1**	**40.8**	**42.7**	**40.1**	**20.7**	1.5	**26.9**	6.4	**13.3**	3.9	9.2	**39.5**	**3.2**	**19.9**	1.4
Pepper, sweet, yellow, pan-fried, without fat	0.6	1.4	6.7	**15.4**	4.0	0.9	**28.2**	1.7	5.4	3.1	1.6	12.3	**11.4**	**91.0**	0.0	11.1
Chick pea, boiled/cooked in water	2.4	3.4	2.0	5.9	6.7	2.6	0.2	1.3	1.2	0.4	0.5	1.8	6.5	0.1	**2.8**	2.4
Wheat bran	**35.8**	**24.1**	**14.5**	3.9	8.0	**17.5**	0.1	15.2	**20.4**	**45.1**	**8.6**	**25.7**	8.2	0.0	0.0	3.0
Flaxseed	5.9	12.4	6.5	**14.4**	**11.0**	12.6	0.0	**23.2**	**7.7**	5.7	3.3	10.7	6.2	0.1	0.0	0.5
Couscous (precooked durum wheat semolina), cooked, unsalted	0.7	1.5	1.1	5.1	1.3	1.2	0.2	1.2	0.2	0.4	1.1	7.3	0.8	0.1	0.0	0.1
Shiitake mushroom, dried	2.8	6.1	**15.6**	2.8	7.0	15.9	0.0	5.7	**49.0**	**26.2**	**73.2**	**16.5**	**10.8**	0.8	**74.5**	0.0
Wheat germ	**35.6**	**18.2**	8.8	4.5	3.4	**25.4**	0.2	**21.9**	4.7	2.7	**3.9**	**12.4**	8.3	0.1	2.2	**15.5**
Potato starch	0.2	0.6	0.3	0.2	1.6	0.3	0.0	0.1	0.2	0.2	2.5	0.1	4.2	0.0	0.0	0.0
Rapeseed oil	0.0	0.0	0.0	1.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	**34.7**
Sweet potato, cooked	0.5	0.5	2.0	1.4	**9.3**	0.3	**64.6**	0.9	1.6	1.0	1.3	2.1	0.2	2.1	0.0	0.8
Sunflower oil	0.0	0.0	0.0	1.4	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7	**27.8**
Thyme, dried	3.8	0.8	1.7	0.5	5.9	2.6	**5.1**	1.9	3.1	1.8	0.0	1.9	3.6	**2.4**	0.0	2.6

Supplementary Table S8 PANDiet, AS, MS, SecDiet scores and probabilities of adequacies in the observed initial diet, in modeled diets without meat and with the optimized meat substitute replacing meat in men and women.

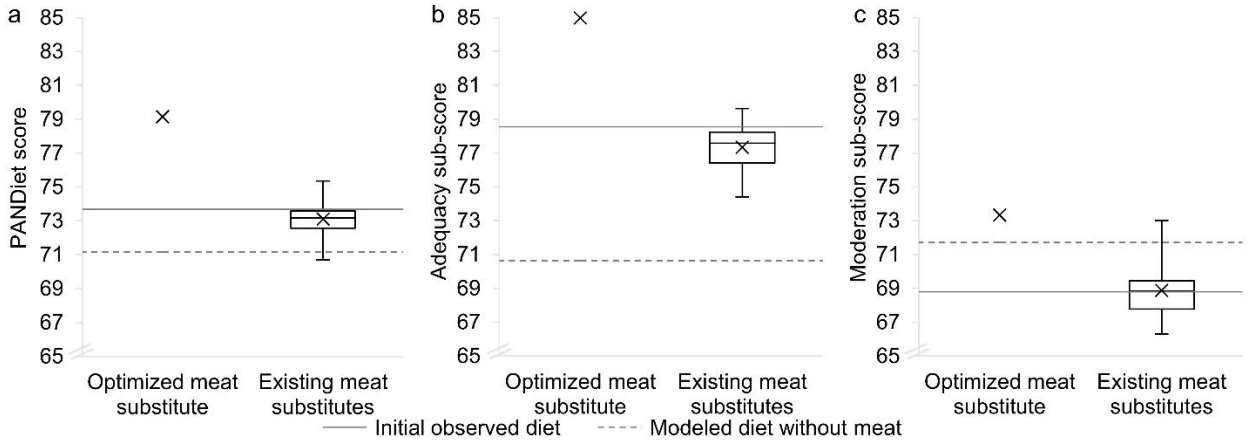
	Women					Men				
		Modeled diets					Modeled diets			
	Observed initial diet	Without meat		With optimized meat substitute		Observed initial diet	Without meat		With optimized meat substitute	
		Without E.A.[a]	With E.A	Without E.A.	With E.A		Without E.A.	With E.A	Without E.A.	With E.A
		Difference from observed initial diet					Difference from observed initial diet			
PANDiet score (0-100)	76.17	**-4.15[b]**	**-2.88**	**+5.25**	**+5.20**	71.35	**-0.88**	**-2.20**	**+5.71**	**+6.16**
PANDiet (Women F+)[c]	75.39	**-4.05**	**-2.83**	**+5.21**	**+5.16**					
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	75.09	**-10.63**	**-3.75**	**+6.72**	**+6.08**	82.31	**-5.24**	**-1.00**	**+6.15**	**+6.05**
AS (Women F+)[c]	73.54	**-10.43**	**-3.65**	**+6.64**	**+6.01**					
Probability of adequacy for AS components (0-1)										
Protein	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
LA	0.59	-0.06	-0.06	**+0.30**	**+0.31**	0.40	-0.08	-0.08	**+0.45**	**+0.46**
ALA	0.00	0.00	0.00	**+0.83**	**+0.84**	0.00	0.00	0.00	**+0.90**	**+0.91**
DHA	0.02	-0.01	+0.01	-0.01	-0.01	0.49	-0.12	+0.14	-0.05	-0.08
EPA+DHA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	-0.06	+0.08	-0.03	-0.04
Fiber	0.15	-0.01	**+0.12**	**+0.83**	**+0.82**	0.56	-0.02	**+0.23**	**+0.44**	**+0.44**
Vitamin A	0.92	-0.08	+0.02	-0.01	-0.02	0.99	-0.05	0.00	-0.01	-0.02
Thiamine	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Riboflavin	1.00	-0.06	0.00	-0.01	-0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Niacin	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pantothenic acid	0.99	-0.04	-0.01	+0.01	+0.01	1.00	-0.03	-0.01	0.00	0.00
Vitamin B-6	0.96	**-0.65**	**-0.35**	**-0.07**	**-0.10**	1.00	**-0.18**	-0.02	0.00	0.00
Folate	0.79	-0.07	+0.09	**+0.16**	**+0.15**	1.00	-0.01	0.00	0.00	0.00
Vitamin B-12	1.00	**-0.62**	**-0.31**	**-0.62**	**-0.66**	1.00	0.00	0.00	0.00	-0.01
Vitamin C	0.23	-0.02	**+0.24**	**+0.50**	**+0.47**	0.78	-0.05	**+0.18**	**+0.22**	**+0.22**
Vitamin D	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vitamin E	0.99	0.00	0.00	+0.01	+0.01	0.99	0.00	0.00	+0.01	+0.01
Iodine	0.96	-0.02	+0.02	+0.01	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Magnesium	0.99	-0.01	0.00	+0.01	+0.01	0.99	-0.02	0.00	+0.01	+0.01
Phosphorus	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Potassium	0.69	**-0.25**	-0.04	**+0.10**	**+0.08**	0.99	-0.06	0.00	0.00	0.00
Selenium	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zinc	0.51	**-0.48**	**-0.45**	**-0.29**	**-0.29**	0.41	**-0.40**	**-0.39**	**-0.30**	**-0.31**
Copper	0.99	-0.01	0.00	+0.01	+0.01	0.99	-0.01	0.00	+0.01	+0.01
Manganese	0.99	0.00	+0.01	+0.01	+0.01	0.99	0.00	+0.01	+0.01	+0.01
Calcium	0.94	-0.01	+0.05	+0.04	+0.03	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Iron	0.81	**-0.35**	**-0.29**	**-0.07**	**-0.08**	0.97	**-0.37**	**-0.30**	**-0.09**	**-0.09**
Iron (Women F+)[c]	0.41	**-0.30**	**-0.27**	**-0.09**	**-0.10**					
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	77.25	**+2.34**	**-2.01**	**+3.78**	**+4.32**	60.40	**+3.47**	**-3.40**	**+5.27**	**+6.28**
Probability of adequacy for MS components (0-1)										
Carbohydrates	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00
Protein	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total fat	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
SFA	0.07	+0.02	+0.02	**+0.13**	**+0.13**	0.10	+0.06	+0.06	**+0.24**	**+0.25**
Sodium	0.66	**+0.12**	**-0.05**	**+0.11**	**+0.13**	0.10	**+0.14**	-0.03	**+0.14**	**+0.16**
Sugars without lactose	0.90	0.00	-0.09	-0.02	-0.01	0.42	+0.01	-0.23	-0.06	-0.03
SecDiet (0-1)	1.00	-0.01	-0.01	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Probability of adequacy of the SecDiet (0-1)										
Vitamin A	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Thiamine	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Riboflavin	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Niacin	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Folate	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vitamin B-12	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vitamin C	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Iodine	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Selenium	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zinc	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Calcium	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Iron	0.99	**-0.09**	**-0.07**	-0.01	-0.01	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00

[a] E.A. means "energy adjustment". For modeled diets with energy adjustment, the difference of energy between the observed initial diet and the modeled diet without energy adjustment was reported on non-meat food items in order to maintain the same energy intake between the observed initial diet and the modeled diet with energy adjustment.
[b] Values are differences between the modeled diet and the observed initial diet. Values in bold are those most affected by removing and/or replacing the meat.
[c] Values when considering iron requirements for women with high iron requirements (Women F+). The modification of the reference value impacts the probability of adequacy of iron, the AS and the PANDiet scores.

Supplementary Table S9 PANDiet, AS, MS, SecDiet scores and probabilities of adequacies in initial diets and modeled diets with the optimized meat substitute in individual substitutions in the INCA3 population (n=1125).

	Women (F) (n=561)			Men (M) (n=564)			Average
	Initial diet	Modeled diet	Δ[a]	Initial diet	Modeled diet	Δ	Δ[b]
PANDiet score (0-100)	67.64 ± 5.78[c]	71.17 ± 6.25*	**+3.54**	67.72 ± 6.22	72.14 ± 7.27*	**+4.43**	**+3.98**
PANDiet (Women F+)[d]	67.09 ± 5.75	70.58 ± 6.21*	**+3.48**				
Adequacy Sub-score (AS) (0-100)	61.63 ± 12.65	65.64 ± 12.06*	**+4.01**	68.89 ± 13.25	73.14 ± 13.10*	**+4.25**	**+4.12**
AS (Women F+)[d]	60.54 ± 12.59	64.45 ± 11.95*	**+3.91**				
Probability of adequacy for AS components (0-1)							
Protein	0.89 ± 0.17	0.78 ± 0.27*	**-0.11**	0.93 ± 0.18	0.86 ± 0.25*	**-0.07**	**-0.09**
LA	0.47 ± 0.31	0.64 ± 0.30*	**+0.17**	0.40 ± 0.35	0.60 ± 0.35*	**+0.21**	**+0.19**
ALA	0.12 ± 0.21	0.57 ± 0.33*	**+0.45**	0.09 ± 0.20	0.58 ± 0.38*	**+0.49**	**+0.47**
DHA	0.16 ± 0.29	0.16 ± 0.28	-0.01	0.25 ± 0.38	0.25 ± 0.38	-0.01	-0.01
EPA+DHA	0.14 ± 0.27	0.14 ± 0.27	0.00	0.23 ± 0.37	0.22 ± 0.36	-0.01	-0.01
Fiber	0.30 ± 0.31	0.68 ± 0.27*	**+0.37**	0.49 ± 0.36	0.83 ± 0.27*	**+0.34**	**+0.36**
Vitamin A	0.49 ± 0.35	0.50 ± 0.35	+0.01	0.50 ± 0.40	0.52 ± 0.39	+0.02	+0.02
Thiamine	0.95 ± 0.09	0.97 ± 0.08*	**+0.01**	0.97 ± 0.07	0.98 ± 0.05*	**+0.01**	**+0.01**
Riboflavin	0.68 ± 0.31	0.63 ± 0.32*	**-0.04**	0.84 ± 0.26	0.81 ± 0.29	-0.03	**-0.04**
Niacin	1.00 ± 0.02	1.00 ± 0.02	0.00	1.00 ± 0.01	1.00 ± 0.01	0.00	0.00
Pantothenic acid	0.86 ± 0.14	0.89 ± 0.13*	**+0.03**	0.89 ± 0.16	0.92 ± 0.14*	**+0.03**	**+0.03**
Vitamin B-6	0.61 ± 0.30	0.55 ± 0.32*	**-0.06**	0.75 ± 0.32	0.72 ± 0.34	-0.03	**-0.05**
Folate	0.55 ± 0.33	0.65 ± 0.29*	**+0.11**	0.75 ± 0.30	0.84 ± 0.24*	**+0.10**	**+0.10**
Vitamin B-12	0.53 ± 0.33	0.31 ± 0.33*	**-0.22**	0.74 ± 0.32	0.47 ± 0.42*	**-0.27**	**-0.24**
Vitamin C	0.37 ± 0.36	0.44 ± 0.37*	**+0.07**	0.45 ± 0.43	0.57 ± 0.41*	**+0.13**	**+0.10**
Vitamin D	0.02 ± 0.06	0.02 ± 0.06	0.00	0.04 ± 0.11	0.04 ± 0.11	0.00	0.00
Vitamin E	0.83 ± 0.18	0.91 ± 0.11*	**+0.08**	0.86 ± 0.20	0.93 ± 0.13*	**+0.07**	**+0.07**
Iodine	0.64 ± 0.30	0.64 ± 0.30	0.00	0.79 ± 0.27	0.79 ± 0.27	0.00	0.00
Magnesium	0.88 ± 0.14	0.93 ± 0.10*	**+0.05**	0.89 ± 0.15	0.94 ± 0.11*	**+0.05**	**+0.05**
Phosphorus	0.96 ± 0.08	0.96 ± 0.08	0.00	0.97 ± 0.08	0.97 ± 0.08	0.00	0.00
Potassium	0.53 ± 0.32	0.57 ± 0.30*	**+0.04**	0.78 ± 0.28	0.81 ± 0.26*	**+0.03**	**+0.03**
Selenium	0.93 ± 0.13	0.92 ± 0.13	0.00	0.97 ± 0.09	0.97 ± 0.09	0.00	0.00
Zinc	0.36 ± 0.32	0.26 ± 0.28*	**-0.10**	0.36 ± 0.37	0.21 ± 0.30*	**-0.14**	**-0.12**
Copper	0.88 ± 0.12	0.94 ± 0.09*	**+0.06**	0.90 ± 0.14	0.95 ± 0.09*	**+0.05**	**+0.05**
Manganese	0.84 ± 0.17	0.94 ± 0.10*	**+0.10**	0.87 ± 0.18	0.96 ± 0.09*	**+0.09**	**+0.10**
Calcium	0.57 ± 0.34	0.62 ± 0.33*	**+0.05**	0.72 ± 0.34	0.78 ± 0.30*	**+0.06**	**+0.05**
Iron	0.63 ± 0.23	0.61 ± 0.21	-0.02	0.77 ± 0.23	0.74 ± 0.24*	**-0.03**	-0.02
Iron (Women F+)[d]	0.35 ± 0.22	0.31 ± 0.19*	**-0.04**				
Moderation Sub-score (MS) (0-100)	73.64 ± 10.53	76.70 ± 10.53*	**+3.06**	66.54 ± 13.35	71.15 ± 13.23*	**+4.61**	**+3.84**
Probability of adequacy for MS components (0-1)							
Carbohydrates	0.94 ± 0.12	0.91 ± 0.16*	**-0.03**	0.94 ± 0.15	0.89 ± 0.19*	**-0.04**	**-0.04**
Protein	0.95 ± 0.13	0.98 ± 0.07*	**+0.03**	0.91 ± 0.21	0.97 ± 0.12*	**+0.06**	**+0.04**
Total fat	0.90 ± 0.18	0.92 ± 0.15*	**+0.02**	0.94 ± 0.15	0.96 ± 0.12*	**+0.02**	**+0.02**
SFA	0.28 ± 0.28	0.39 ± 0.31*	**+0.11**	0.31 ± 0.32	0.47 ± 0.36*	**+0.15**	**+0.13**
Sodium	0.64 ± 0.30	0.69 ± 0.30*	**+0.05**	0.38 ± 0.36	0.46 ± 0.37*	**+0.08**	**+0.06**
Sugars without lactose	0.71 ± 0.31	0.71 ± 0.31	0.00	0.55 ± 0.38	0.54 ± 0.38	-0.01	-0.01
SecDiet	0.91 ± 0.09	0.91 ± 0.09	0.00	0.94 ± 0.09	0.95 ± 0.09	0.00	0.00
Probability of adequacy of the SecDiet (0-1)							
Vitamin A	0.88 ± 0.18	0.90 ± 0.16	+0.02	0.88 ± 0.24	0.91 ± 0.20*	**+0.03**	+0.02
Thiamine	1.00 ± 0.01	1.00 ± 0.01*	**0.00**	1.00 ± 0.01	1.00 ± 0.01	0.00	0.00
Riboflavin	0.92 ± 0.12	0.91 ± 0.14	-0.01	0.96 ± 0.12	0.95 ± 0.14	-0.01	-0.01
Niacin	1.00 ± 0.02	1.00 ± 0.02	0.00	1.00 ± 0.01	1.00 ± 0.01	0.00	0.00
Folate	0.91 ± 0.15	0.95 ± 0.11*	**+0.03**	0.96 ± 0.13	0.97 ± 0.10*	**+0.01**	**+0.02**
Vitamin B-12	0.97 ± 0.05	0.93 ± 0.11*	**-0.04**	0.98 ± 0.06	0.94 ± 0.16*	**-0.04**	**-0.04**
Vitamin C	0.97 ± 0.06	0.98 ± 0.04*	**+0.01**	0.98 ± 0.06	0.98 ± 0.05*	**+0.01**	**+0.01**
Iodine	0.87 ± 0.16	0.87 ± 0.16	0.00	0.93 ± 0.16	0.93 ± 0.16	0.00	0.00
Selenium	0.99 ± 0.03	0.99 ± 0.03	0.00	0.99 ± 0.02	0.99 ± 0.02	0.00	0.00
Zinc	0.99 ± 0.03	0.99 ± 0.03	0.00	0.99 ± 0.04	0.99 ± 0.05	0.00	0.00
Calcium	0.92 ± 0.14	0.94 ± 0.12*	**+0.02**	0.95 ± 0.14	0.97 ± 0.10*	**+0.02**	**+0.02**
Iron	0.94 ± 0.10	0.95 ± 0.11	0.00	0.98 ± 0.05	0.98 ± 0.05	0.00	0.00

[a] Δ is the difference between the mean of "Modeled diet" and the mean of "Initial diet".
[b] Average Δ is the mean of Δ(F) and Δ(M) (Δ(F+) for PANDiet, AS and probability of adequacy of iron) and weighted by their respective distributions in the study population.
[c] Values are means ± SD weighted for the survey design. *Significantly different from the mean of "Initial diet" assessed by t-test. P<0.05. Values in bold are those significantly affected by replacing meat.
[d] Values when considering iron requirements for women with high iron requirements (Women F+). The modification of the reference value impacts the probability of adequacy of iron, the AS and the PANDiet scores.



Supplementary Figure S2 a. PANDiet, b. AS and c. MS scores in modeled diets where meat food items were replaced with the optimized meat substitute or with existing meat substitutes (n=43). Modeled diets were not adjusted for energy intake. Whiskers of the boxplot represent min and max of scores obtained in the modeled diet with available meat substitutes. Horizontal lines represent scores in the initial diet (full line) or in a modeled diet where meat food items were removed (dashed line).

Supplementary Table S10 List of ingredients in the different optimized meat substitutes obtained after releasing several technological constraints.

Ingredient sub-group	Ingredient	Optimized meat substitute	Releasing of technological constraints		
			Pulses and cereals constraints only [a]	Ingredients category constraints only [b]	All technological constraints [c]
		g/100g			
Pulses	Navy bean, boiled/cooked in water	41.59	-	-	-
	Chick pea, boiled/cooked in water	5.77	-	-	-
	Broad bean, boiled/cooked in water	-	27.94	-	-
Vegetables, cooked	Pepper, sweet, yellow, pan-fried, without fat	15.00	19.50	19.18	-
	Chinese cabbage (nappa cabbage or bok choy), cooked	-	-	30.00	-
Fragmented cereals, >10g/100g of protein	Wheat bran	5.63	7.64	-	-
	Wheat germ	4.37	23.42	-	-
Fragmented cereals, <10g/100g of protein	Couscous (precooked durum wheat semolina), cooked, unsalted	5.00	-	-	-
Nuts and seeds	Flaxseed	5.00	5.00	9.11	4.43
	Poppy, seed	-	-	11.54	6.12
Vegetables and fruits, dried	Shiitake mushroom, dried	5.00	0.50	18.00	38.49
	Chinese black mushroom, dried	-	-	-	23.58
Vegetable oils	Rapeseed oil	3.60	4.90	-	14.14
	Sunflower oil	1.40	0.10	-	-
Starch	Potato starch	3.89	0.50	-	-
Tubers and garden peas	Sweet potato, cooked	2.74	4.47	-	-
	Garden peas, cooked	-	5.03	-	-
Herbs, spices and salt	Thyme, dried	1.00	1.00	3.21	13.06
	Basil, dried	-	-	8.90	-
	Laver (Porphyra sp.), dried or dehydrated	-	-	0.07	0.19
	Δ(PANDiet) with the optimized meat substitute		+0.73	+1.63	+3.53
	Δ(AS) with the optimized meat substitute		+2.26	+3.89	+4.50
	Δ(AS) with the optimized meat substitute		-0.81	-0.63	+2.56

[a] Constraints on cereals (n=5) and on pulses (n=1) were deleted. All other constraints were kept similar.
[b] All technological constraints were deleted except the water content and the limits on energy content for men and women.
[c] All technological constraints were deleted.

References

1. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, et al (2012) Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. PLoS ONE 7:e42155. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042155

2. Salomé M, Huneau J-F, Le Baron C, et al (2021) Substituting Meat or Dairy Products with Plant-Based Substitutes Has Small and Heterogeneous Effects on Diet Quality and Nutrient Security: A Simulation Study in French Adults (INCA3). J Nutr nxab146. https://doi.org/10.1093/jn/nxab146

3. Anses (2021) AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « Actualisation des références nutritionnelles françaises en vitamines et minéraux » ; saisine n°2018-SA-0238. Saisine liée n°2012-SA-0103.

4. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F (2018) Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. Nutrients 10:226. https://doi.org/10.3390/nu10020226

5. Salomé M, Kesse-Guyot E, Fouillet H, et al (2020) Development and evaluation of a new dietary index assessing nutrient security by aggregating probabilistic estimates of the risk of nutrient deficiency in two French adult populations. Br J Nutr 1–34. https://doi.org/10.1017/S0007114520005115

6. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations (2004) Vitamin and mineral requirements in human nutrition, 2nd ed. World Health Organization ; FAO, Geneva : Rome

7. EFSA (European Food Safety Agency) (2017) Dietary Reference Values for nutrients: Summary report. 92. https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2017.e15121

8. Nordic Council of Ministers (2014) Nordic Nutrition Recommendations 2012: Integrating nutrition and physical activity. Nordic Council of Ministers, Copenhagen

9. World Health Organization, Food and Agriculture Organization of the United Nations, International Atomic Energy Agency (1996) Trace elements in human nutrition and health. World Health Organization, Geneva

10. Anses (2016) Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses)., Maisons-Alfort, France

11. Otten JJ, Hellwig JP, Meyers LD (2006) DRI, dietary reference intakes: the essential guide to nutrient requirements. National Academies Press, Washington, D.C

12. Wang D, Chen X-H, Fu G, et al (2015) Calcium intake and hip fracture risk: a meta-analysis of prospective cohort studies. Int J Clin Exp Med 8:14424

13. Bolland MJ, Leung W, Tai V, et al (2015) Calcium intake and risk of fracture: systematic review. BMJ h4580. https://doi.org/10.1136/bmj.h4580

14. Bischoff-Ferrari HA, Dawson-Hughes B, Baron JA, et al (2007) Calcium intake and hip fracture risk in men and women: a meta- analysis of prospective cohort studies and randomized controlled trials. Am J Clin Nutr 86:1780–1790

15. Wémeau J-L (2010) Chapitre 8. Goitres simples et nodulaires. In: Les maladies de la thyroïde. Masson

16. Equipe de Surveillance et d'épidémiologie nutritionnelle (ESEN) (2019) Étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (Esteban), 2014-2016. Volet Nutrition. Chapitre Dosages biologiques : vitamines et minéraux. Santé Publique France, Saint-Maurice, France

17. Hoffmann K, Boeing H, Dufour A, et al (2002) Estimating the distribution of usual dietary intake by short-term measurements. Eur J Clin Nutr 56:S53–S62. https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601429

18. National Research Council (1986) Nutrient Adequacy: Assessment Using Food Consumption Surveys. National Academies Press, Washington, DC

19. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (2020) ANSES-CIQUAL French food composition table version 2020

20. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (2016) ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016

21. Etude NutriNet-Santé (2013) Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database). Economica, Paris

2.7. Article n°7 : Les substituts végétaux de viande sont utiles pour concevoir des régimes alimentaires plus sains s'ils ont une composition nutritionnelle adéquate : une étude d'optimisation chez les adultes français (INCA3)

Résumé

Contexte : Les substituts végétaux de viande sont de plus en plus consommés. Cependant, la place qu'ils pourraient avoir dans un régime alimentaire sain a été peu étudiée.

Objectifs : Etudier si les substituts végétaux de viande pourraient servir de levier efficace dans la modélisation de régimes alimentaires plus sains et dans quelle mesure cela dépend de leur composition nutritionnelle.

Méthode : A partir des consommations alimentaires des adultes français (INCA3, n=1125, 18-64 ans), nous avons modélisé des régimes alimentaires plus sains, c'est-à-dire favorisant la consommation de céréales complètes, légumes et fruits et limitant la consommation de viande rouge, charcuterie et boissons sucrées, tout en assurant les besoins nutritionnels des hommes et des femmes. La modélisation de régimes alimentaires a été réalisée avec une procédure d'optimisation non-linéaire maximisant un critère *Régime alimentaire sain* basé sur les groupes d'aliments ci-dessus à favoriser ou limiter, et minimisant l'écart par rapport au régime observé. Au cours de ce travail, des substituts végétaux de viande étaient introduits dans le répertoire alimentaire : un substitut moyen (composition nutritionnelle moyenne de 43 substituts de viande déjà existants) et un substitut optimisé (tel qu'identifié par le travail de l'article n°6). Ces substituts étaient soit non enrichis, soit enrichis en fer et zinc à 30% ou 50% des Valeurs Nutritionnelles de Références. Ces substituts pouvaient être introduits à la place de la viande, sans peser sur l'écart au régime observé.

Résultats : Sans enrichissement, le substitut moyen n'était quasiment pas introduit dans les régimes modélisés (1g/jour) alors que le substitut optimisé était introduit à 90 g/jour et permettait une réduction de 20% de la consommation de viande rouge. Par rapport au substitut moyen, le substitut optimisé contribuait davantage aux apports en vitamine B6 et C, fibres et acide alpha-linolénique et contribuait moins aux apports en sodium. L'enrichissement en fer et zinc permettait de compenser les apports en fer et zinc absorbés apportés par la viande et permettait ainsi une plus forte intégration des substituts et une réduction plus importante de la consommation de viande rouge (jusqu'à -56% avec le substitut moyen et -90% avec le substitut optimisé). Dans tous les régimes modélisés, la consommation de légumes, fruits, céréales complètes, produits de la mer, produits laitiers, œufs et matières grasses végétales était plus importante que dans le régime observé alors que la consommation de céréales raffinées, viande, charcuterie, boissons sucrées et matières grasses animales était plus faible. Dans les régimes modélisés avec le substitut optimisé, le gain du critère *Régime alimentaire sain* était plus important alors que l'écart au régime observé était plus faible par rapport aux régimes modélisés avec le substitut moyen.

Conclusion : Les substituts végétaux de viande peuvent faciliter l'adoption de régimes alimentaires sains et nutritionnellement adéquats, à condition qu'ils aient une bonne composition nutritionnelle et qu'ils contiennent suffisamment de fer et de zinc pour permettre de réduire la consommation de viande rouge sans compromettre les apports en ces nutriments.

Valorisation : Cet article est en cours de rédaction en vue d'être soumis pour publication.

Messages clés

- Les substituts végétaux actuellement disponibles présentent peu d'intérêts dans la modélisation de régimes alimentaires sains, et leur intégration semble être notamment limitée par leur teneur en sodium.
- Le substitut avec une composition nutritionnelle optimisée est préféré au substitut moyen et permet une réduction plus importante de la consommation de viande associée à un écart plus faible au régime observé.
- L'enrichissement des substituts en fer et zinc apparaît nécessaire pour permettre une réduction plus importante de la consommation de viande.
- La consommation de viande évolue différemment en fonction des types de viande : la consommation de porc, charcuterie et volaille diminue alors que celle d'abats augmente et l'évolution de la consommation de bœuf varie en fonction des scénarios.
- Remplacer la viande par des substituts végétaux n'est cependant pas le seul changement diététique nécessaire dans l'établissement de régimes alimentaires sains.

Plant-based meat substitutes are useful to design healthier dietary patterns if adequately formulated: an optimization study in French adults (INCA3).

Marion Salomé[1], François Mariotti[1]*, Alison Dussiot[1], Emmanuelle Kesse-Guyot[2], Jean-François Huneau[1], Hélène Fouillet[1]

[1]Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France

[2]Sorbonne Paris Nord University, Inserm, Inrae, Cnam, Nutritional Epidemiology Research Team (EREN), Epidemiology and Statistics Research Center – University of Paris (CRESS), 93017 Bobigny, France

* corresponding author. 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris, France. francois.mariotti@agroparistech.fr

Abstract

Background: The role of plant-based meat substitutes to contribute to healthy eating patterns has been little investigated.

Objective: We studied to what extent plant-based meat substitutes could help to model healthier dietary patterns, depending on their nutrient composition.

Methods: Observed diets were extracted from dietary intakes of the French adult population (INCA3, n=1125). Modeled diets were identified in men and women separately, by allowing dietary changes including meat substitution with two plant-based substitutes: an average substitute (from 43 available market substitutes) and a theoretical optimized substitute (i.e. with an ingredient and nutrient composition designed to optimize diet quality), fortified or not with zinc and iron at 30% or 50% of Nutrient Reference Values. In each scenario, modeled diets were identified using a non-linear optimization procedure that maximized a *Healthy dietary pattern* criteria based on food groups to increase or reduce and minimized deviation from observed diets, while ensuring nutrient adequacy.

Results: Without fortification, the average substitute was hardly introduced in modeled diets whereas the optimized substitute was introduced at 90 g/d and allowed a moderate reduction in red meat intake (-20%). As compared to the average substitute, the optimized substitute made a higher contribution to vitamins B6 and C, fiber and ALA intakes and lower contribution to sodium intake. Fortifications with iron and zinc led to approximately matching the contribution of meat to bioavailable iron and zinc intakes and therefore led to much higher reductions in red meat intake (down to -90%). With the optimized substitute, modelled diets were healthier and with a lower deviation from observed diet.

Conclusion: Plant-based meat substitutes can facilitate the implementation of healthy diets only if they are well nutritionally designed with appropriate ingredients and if they contain enough zinc and iron to enable a reduction in red meat intake.

Keywords: Plant-based meat substitutes; Diet optimization; Healthy dietary patterns; Nutrient fortifications

Introduction

Plant-based meat substitutes are products that aim to mimic the appearance and use of meat products and are undergoing strong market development (1,2). These products are seen as a good way to replace meat in a dish without disrupting the meal pattern (3) and therefore they could assist to the transition towards more plant-based diets, which is advocated for health and environmental reasons (4,5).

Indeed, along with their high environmental impacts (6–8), current dietary patterns in western countries are not healthy, favoring the development of non-communicable diseases (9). In this context, modeling studies have been used to identify healthier dietary patterns that could assist the definition of food-based dietary guideline (10,11). For instance, the most recent French dietary guidelines are based on an optimization method modeling dietary patterns that could favor long-term health, based on epidemiological relations between food groups consumption and the risk of non-communicable diseases (12–14). As for many dietary guidelines, the consumption of plant-based foods (vegetables, fruits, whole-grain products, legumes) is encouraged while the reduction of consumption of sweet and salty foods, red meat and processed meat is advocated (12,15,16).

However, the role of plant-based meat substitutes to model healthy diets has been rarely considered (17). Indeed, there are concerns whether plant-based substitutes could be part of a healthy diet, as their impacts on health has been little studied and many appear to be ultra-processed (18,19). Furthermore, their nutritional composition and impacts on diet can vary depending on the type of substitute and ingredients used (20,21). Plant-based meat substitutes are generally low in total and saturated fat and high in fiber compared to meat, but may also contain high level of sodium (20,22), while meat products that they are intended to replace are important contributors of indispensable nutrients such as iron and zinc (16,23).

Therefore, the objective of this study was to investigate whether plant-based meat substitutes could be a potential nutritional lever to support healthier dietary patterns, with effective replacing of meat and lesser departure from observed diets. We explored to what extent the introduction of plant-based meat substitute in the food repertoire could be useful to model healthy eating pattern, and if it could depend on the nutrient composition of the meat substitute and on a theoretical fortification in iron and zinc.

To do this we used multi-criteria optimization to identify modeled diets that would be healthier while remaining close to observed diets, according to series of scenarios where two distinct meat substitutes with gradual levels of fortification in iron and zinc were introduced in the food repertoire. The first meat substitute corresponded to an average substitute having the mean nutrient composition of meat substitutes available in the market while the second meat substitute was a substitute for which the recipe has been previously optimized for nutrient content (*Article n°6*).

Methods

<u>Input dietary data</u>

The data used in this study were extracted from the third French Individual and National Study on Food Consumption Survey 3 (INCA3) conducted in 2014-2015. Briefly, the INCA3 survey is a representative cross-sectional survey of the French population and its method and design have been fully described elsewhere (24). Men aged 18-64y (n=561) and women aged 18-54y (n=564), non-identified as under-reporters (25,26) were included in the study. The final sample contained 1125 adults.

Dietary data were collected by professional investigators assisted by a dietary software from three unplanned non-consecutive 24h-dietary recalls spread over a 3-week period. Portion sizes were estimated using validated photographs (24) and the nutrient content of food items came from the 2016 food composition database from the French Information Centre on Food Quality (CIQUAL) (27). Mixed foods were broken down into ingredients and then gathered into 45 food groups. The nutrient content of each food group was calculated, for each gender, as the mean nutrient content of food items constituting the food group weighed by their mean intake in the considered gender (28) **(Supplemental Table 1)**.

Diet multi-criteria optimization under constraints

We used a multi-objective, non-linear mathematical optimization program in order to identify the dietary pattern being both the healthiest and closest to the observed one (to account for cultural acceptability and inertia), under the constraints to ensure adequate nutrient intakes and to stay within current consumption limits. In this regard, we investigated the introduction of plant-based meat substitutes in the food repertoire.

The optimization was performed using the OPTMODEL procedure of the software SAS version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.). The optimization was carried out at the population level in men and women separately. Optimized diets of men and women were then gathered to derive optimized diets at the overall population level by weighting each population by its relative distribution in the study population.

Objective function

The optimization procedure consisted in maximizing the healthy dietary pattern value of the modeled diet (*Healthy dietary pattern* objective sub-function, *HDP*) while minimizing its deviation from the current diet (*Diet Departure* objective sub-function, *DD*), as previously performed (13,28).

The *HDP* sub-function set as objective the dietary recommendations based on epidemiological studies assessing associations between food groups consumption and the risk of chronic diseases (14,28). It thus aims at limiting the consumption of red meat, processed meat and sweetened beverages while promoting the consumption of whole cereal products, vegetables and fruits, in accordance with current French recommendations (12). *HDP* was thus expressed and maximized as:

$$\text{Max}\, HDP = \sum_{i=1}^{3} \left[\frac{\text{Opt(i)}}{\text{P95(i)}}\right] - \sum_{\text{j=1}}^{3} \left[\frac{\text{Opt(j)}}{\text{Max(j)}}\right]$$

Where i is the number of food groups to increase (vegetables, fruits and whole cereal products), j is the number of food groups to decrease (red meat, processed meat and sweetened beverages),

Opt(i) and Opt(j) are the optimized consumptions of food groups i and j, respectively (in g/d), P95(i) is the current 95th percentile of consumption of food group i (in g/d) and Max(j) is the upper limit of consumption of food group j (in g/d). This latter value was of 71, 25 and 263 g/d respectively for red meat, processed meat and sweetened beverages as defined by the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (Anses) (13).

The *DD* sub-function minimizes the deviation from the observed diet to account for dietary cultural acceptability and inertia. It was defined as the sum of the squares of the differences between observed and optimized food group consumptions standardized by their observed standard deviations (28). *DD* was thus expressed and minimized as:

$$\text{Min } DD = \sum_{k=1}^{n} \left[\frac{\text{Obs(k) - Opt(k)}}{\text{SD(k)}}\right]^2$$

Where k is the number of food groups, Obs(k) and Opt(k) are respectively the observed and optimized consumptions of food group k (in g/d) and SD(k) is the current standard deviation of the consumption of food group k.

Some food groups were however considered easily substitutable between them: fruits groups (fresh/dry/processed fruits), breads groups (refined/whole grains), other starches groups (refined/whole grains), vegetable fats groups (low/high in alpha-linolenic acid), soft drinks groups (sodas/fruits juices), fishes groups (fat/lean fishes), fresh dairy products groups (natural/sweetened), soups/bouillon groups. Most meat groups (beef and veal/pork and other meats/poultry) were also considered substitutable with each other and with plant-based meat substitutes, on the rationale that these products are designed to replace meat in a meal (3). In the *DD* sub-function, the food groups within each easily substitutable family were grouped together to consider only variations in their sums (and not their individual variations), so that such intra-families substitutions were allowed without cost.

Finally, the optimization procedure consisted in minimizing a whole objective function combining the two objective sub-functions: min *Obj* = min (*DD* – *HDP*) to concomitantly minimize *DD* and maximize *HDP*.

<u>Constraints</u>

Nutritional constraints were applied during optimization to ensure adequate nutrient intakes in men and women populations (**Supplemental Table 2**). These constraints were based on the latest reference values from Anses (29).

For iron and zinc, since absorption depends on dietary factors, requirements were based on bioavailable iron and zinc calculated from dietary intake using equations that predict their absorption (28,30–32). Previous work demonstrated that current recommendations on bioavailable iron and zinc are very constraining to adopt healthier diet, but that allowing more flexibility would increase the prevalence of iron deficiency (28). Therefore, for this work, nutritional constraints for bioavailable iron and zinc were based on current intakes, so as to avoid any increase in the prevalence of iron deficiency in modeled diets. An additional model was however studied using current recommendations for bioavailable iron and zinc (**Supplemental Method 1**).

Dietary constraints were also applied for food groups included in the *HDP* sub-function for which the consumption needed to be limited: red meat intake (beef and veal/pork and other meats/offal) was limited at 71g/d, processed meat intake at 25g/d and sweetened beverages intake (sodas/fruits juices) at 263 mg/d (corresponding to the average portion size) (13).

Finally, acceptability constraints were also applied to keep food groups intakes within the range of observed intakes, by bounding each food group intake between its 5th and 95th percentile of observed consumption in men and women separately (**Supplemental Table 3**), except for food groups for which a dietary constraint with an upper limit was already defined (red meat, processed meat and sweetened beverages). Most food groups that were considered easily substitutable in the *DD* sub-function were also grouped together for the acceptability constraints. Additional constraints were also applied to restrict the introduction of meat substitutes such as the total intake of meat and meat substitutes should not exceed the 99th percentile of the initial consumption of meat (**Supplemental Table 3**).

Plant-based meat substitutes in modeling scenarios

So as to study the potential of plant-based meat substitutes for modeling healthier diets, two types of plant-based meat substitute were introduced in the optimization procedure. These two substitutes were not initially consumed in observed diets and were introduced in the food repertoire of men and women in the optimization procedure. In observed diets, there was however a food group named “Substitutes of animal products” that gathered both meat and dairy substitutes. In order not to interfere with the introduced substitutes, the intake of this group was kept constant in modeled diets. As explained above, beef and veal, pork and others meats and poultry groups could be substituted with meat substitute without cost in the *DD* sub-function.

The first substitute was an average meat substitute that corresponded to the mean nutrient composition of 43 plant-based meat substitutes (**Supplemental Table 4**) whose detailed nutrient compositions were extracted from French databases (27,33,34). The second substitute was an optimized meat substitute whose ingredients have been previously optimized to improve the diet quality of French adults when replacing meat products with the optimized substitute (*Article n°6*). Its ingredient composition is shown in **Supplemental Table 5**. The nutrient compositions of the average and optimized meat substitutes are shown in **Table 1**.

We also simulated the introduction in the food repertoire of the same meat substitutes after theoretical fortification in zinc and iron that reached 30% or 50% of the Nutrient Reference Values (NRVs) (35). Without fortification, the average and optimized substitutes initially contained 2.4 and 4.4 mg/100g of iron and 1.4 and 2.4 mg/100g of zinc, respectively. With a fortification at 30% of the NRVs, the average and optimized substitutes contained 4.2 and 4.4mg/100g of iron, respectively (because the optimized substitute already contained more than 30% of the NRV of iron) and contained both 3 mg/100g of zinc. With a fortification at 50% of the NRVs, both substitutes contained 7 mg/100g of iron and 5 mg/100g of zinc.

Two different options for introducing the meat substitutes were investigated: only the average substitute could be introduced to the food repertoire (AS scenarios) or both the average and the optimized substitutes could be introduced, at different shares (OS scenarios). These two options were conducted without or with the two levels of substitute fortification, leading to six modeling

scenarios in total. We thus identified modeled diets with possible introduction of the average substitute non fortified (AS) and fortified with zinc and iron at 30% (AS-30%) and 50% (AS-50%) of the NRVs, and modeled diets with possible introduction of both substitutes non fortified (OS) and fortified for zinc and iron at 30% (OS-30%) and 50% (OS-50%) of the NRVs.

Table 1. Nutrient composition (per 100g of product) of the average meat substitute and the optimized meat substitute introduced in the repertoire for diet modeling.

	Average meat substitute	Optimized meat substitute
	/100g	
Energy (kcal)	187.22	211.42
Protein (g)	14.30	8.83
Fiber (g)	4.46	12.98
Sugar without lactose (g)	1.79	2.21
Lipids (g)	8.44	8.15
Saturated fatty acids (g)	1.19	0.86
Linoleic acid (g)	3.06	2.26
Alpha-linolenic acid (g)	0.23	1.24
Vitamin A (µg)	13.64	37.11
Vitamin B1 (µg)	105.55	263.12
Vitamin B2 (mg)	0.06	0.13
Vitamin B3 (mg)	0.68	2.70
Vitamin B5 (mg)	0.35	1.50
Vitamin B6 (mg)	0.09	0.29
Vitamin B9 (µg)	43.08	75.13
Vitamin B12 (µg)	0.04	0.00
Vitamin C (mg)	1.70	20.76
Vitamin D (µg)	0.07	0.26
Vitamin E (mg)	2.46	2.88
Vitamin K1 (µg)	11.72	24.27
Calcium (mg)	78.19	75.33
Copper (mg)	0.27	0.57
Iron (mg)	2.42	4.37
Iodine (µg)	8.92	7.72
Magnesium (mg)	88.24	97.10
Manganese (mg)	1.03	2.09
Phosphorus (mg)	183.44	240.76
Potassium (mg)	313.90	489.83
Selenium (µg)	9.36	9.75
Sodium (mg)	483.78	9.33
Salt (g)	1.15	0.02
Zinc (mg)	1.39	2.41
Phytate (g)	80.00	176.71

Analysis of the relative influence of nutritional constraints and food group contribution to limiting nutrients

We reported the dual values associated with each constraint during optimization, which represent what would be the gain in objective function if the limiting bound (lower or upper) of the considered constraint was relaxed by one unit. In order to compare the relative influence of the constraints on modeled diet identification, all constraints were standardized by the value of their limiting bound (36). This resulted in standardized dual values representing the potential effect of a 100% relaxation of the limiting bound of the constraint, and allowed to classify the constraints from the most active (high absolute value) to the least active (close or equal to zero).

For the most limiting nutrients in the different modeled diets, i.e. nutrients having the most active/binding constraints, we studied the contribution of food groups to that nutrient intake in each modeled diet, for all scenarios.

Results

Modeled diets with non-fortified plant-based meat substitutes

Without fortification in iron and zinc, when only the average meat substitute was introduced in the repertoire (scenario AS), it was virtually not introduced in the diet (1g/d) and when both substitutes could be introduced in the repertoire (scenario OS), only the optimized meat substitute was introduced in the diet, in a large amount (90g/d) (**Figure 1**). Compared to the observed diet, both scenarios led to healthier dietary patterns with more vegetables, fruits, whole grain products and less refined grain products, processed meat and soft drinks. There was also a higher intake of seafood, dairy products, eggs, potatoes and vegetable fat and a lower intake of animal fat (**Supplemental Table 6**). The *HDP* gain (defined as the difference of *HDP* values between modeled and observed diets) was close for both scenarios (2.6 in the AS scenario and 2.4 in the OS scenario) but the *DD* was lower in the OS scenario (2.3) than in the AS scenario (3.9), meaning a higher similarity with the observed diet for the OS scenario (**Figure 2**).

Regarding meat consumption (**Figure 3**), in the AS scenario that hardly introduced the average meat substitute, poultry doubled (+97%) and red meat remained unchanged compared to the observed diet. In contrast, in the OS scenario that significantly integrated the optimized substitute, poultry was entirely removed and red meat was moderately reduced (-20%). Furthermore, in both scenarios, there were large disparities between red meat types: offal was systematically greatly increased (respectively +180% or +160% in the AS and OS scenarios) and beef & veal was moderately increased (respectively +39% and +11%) while pork & other meats was entirely removed (**Supplemental Table 7**).

There were also some differences in meat pattern consumptions between sexes (Supplemental Table 7). In men, red meat decreased similarly in both scenarios (-10%) to reach its upper limit (71g/d) without going below, processed meat was removed and poultry increased in the AS scenario (+203%) but was removed in the OS scenario. In women, red meat increased in the AS scenario (+17%) but decreased in the OS scenario (-38%), poultry remained stable in the AS scenario but was removed in the OS scenario, and processed meat decreased in both scenarios

(-73% in the AS scenario and -53% in the OS scenario). The *HDP* gain and the *DD* values were higher in men than in women (**Supplemental Table 8**).

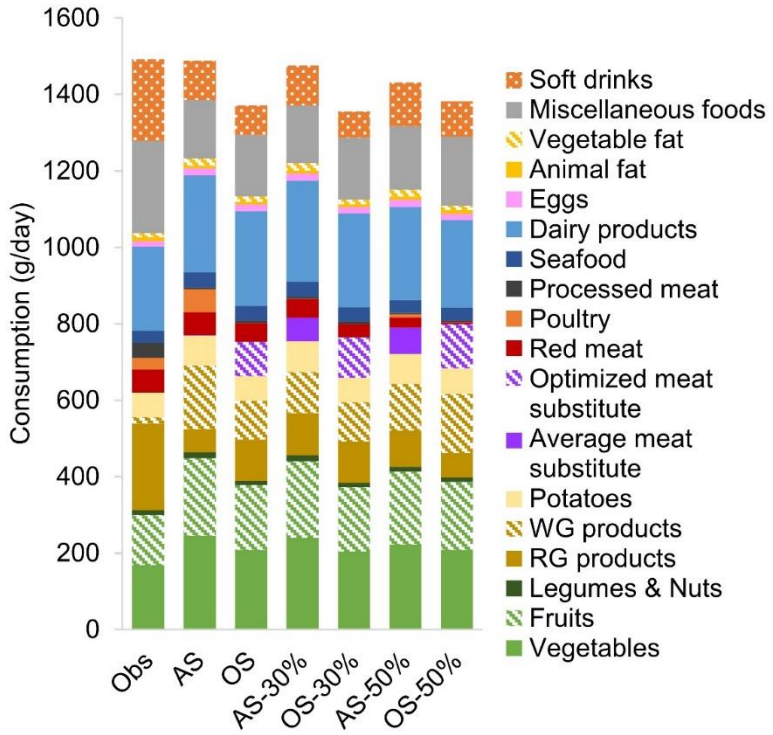


Figure 1. Food groups consumption in observed and modeled diets according to different scenarios of optimization in the whole population. Obs, observed diet. AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction of the average meat substitute respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. RG, refined grains; WG, wholegrains. Water and hot beverages consumptions are not shown, for clarity.

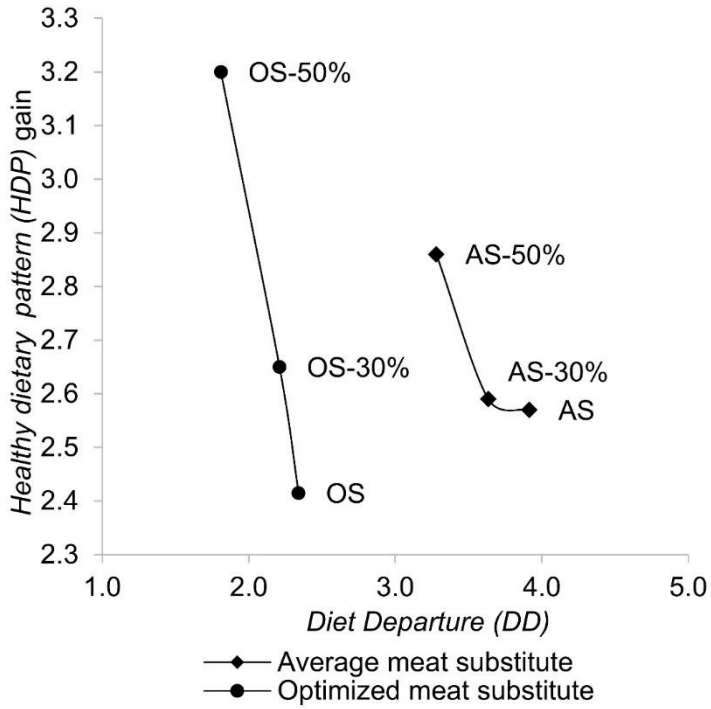


Figure 2. *Healthy dietary pattern* (*HDP*) gain (difference of *HDP* values between modeled and observed diets) vs *Diet Departure* (*DD*) for different modeled diets. AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction of the average meat substitute respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs.

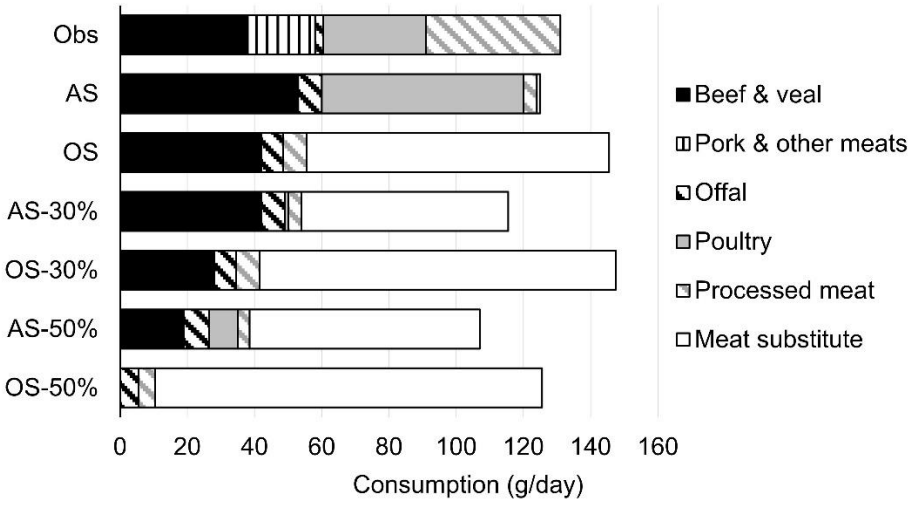


Figure 3. Consumption of red meat (beef & veal, pork & other meats, offal), processed meat, poultry and meat substitutes in observed and modeled diets. Obs, observed diet. AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction in the repertoire of the average meat substitute not fortified, or fortified with iron and zinc at 30% or 50% of the NRVs, respectively. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes not fortified, or fortified with iron and zinc at 30% or 50% of the NRVs, respectively.

Influence of the fortification in iron and zinc on modeled diet composition, *HDP* and *DD* values

The fortification in iron and zinc (at 30 or 50% of the NRV) led to a higher introduction of meat substitutes in dietary patterns (Figure 1). While the average meat substitute was hardly introduced in the AS scenario, it reached 62g/d in the AS-30% scenario and 69g/d in the AS-50% scenario. However, it was never introduced in diets where both substitutes were available in the repertoire since the optimized meat substitute was always preferred and introduced in amounts increasing along with its fortification level (106g/d in the OS-30% scenario and 115g/d in the OS-50% scenario).

Introducing fortified meat substitutes led to greater reductions in meat intake, especially with the optimized meat substitute (Figure 3). Red meat reductions varied from -19% and -56% in the AS-30% and AS-50% scenarios respectively, to -43% and -91% in the OS-30% and OS-50% scenarios respectively. While pork & other meats was systematically removed, and offal increased, beef & veal reduction was effective only in the scenarios AS-50%, OS-30% and OS-50%. Processed meat was reduced although not entirely (-83% to -91%) and poultry reduction varied between -72% and -100% (Supplemental Table 7). Red meat reductions were generally higher in women than in men but offal increased more in women and processed meat persisted in women but not in men. Changes to other food groups in modeled diets were similar than in scenarios with non-fortified substitutes.

Introducing fortified meat substitutes increased the *HDP* gain while slightly decreasing the *DD* (Figure 2). The *HDP* gain was however slightly more important and the *DD* always largely lower with the optimized meat substitute than with the average meat substitute (Supplemental Table 8).

In an alternative optimization procedure, the nutritional constraints on bioavailable iron and zinc were based on recommended intakes rather than on observed intakes (**Supplemental Tables 9 and 10**). In this case, the red meat decrease was much lower and only effective in AS-50% and OS-50% scenarios. This was especially marked in women with “high” iron requirements where red meat intake systematically increased to reach its upper limit (71g/d). When considering women with “low-to-medium” iron requirements, red meat intake increased except in the OS-50% scenario. For men, modeled change in meat intake was quite similar but less marked when using recommended intakes rather than observed levels of bioavailable iron and zinc as nutritional constraints.

Identification of active constraints in the different optimization scenarios

Whatever the scenario, the most limiting nutritional constraints in both men and women were for bioavailable zinc, sodium, saturated fatty acids and vitamin A (Supplemental Table 8). Some constraints were more active in women than in men (iodine and sugars without lactose). Interestingly, the constraints on bioavailable zinc and iron worked together by involving similar dietary changes, even if the most limiting constraint (zinc) was so predominant that it masked the influence of the iron constraint (but its influence could be revealed when relaxing the zinc constraint, Supplemental Table 8). The constraint on zinc was more active in men than in women and the constraint was less active when meat substitutes were fortified at 50% of the NRV in iron and zinc. The constraint on sodium was more active in scenarios with the average meat substitute, and constraints on fiber, ALA and vitamin B6 were only active in these scenarios.

Contributions of food groups to nutrient intakes in different optimization scenarios

We investigated the contribution of each food group to the intake of the most limiting nutrients (i.e. with the most active constraints) and for the nutrients for which meat (red meat, poultry and processed meat) and/or meat substitute contributed significantly (>10% of nutrient intake in the observed diet or a modeled diet) (**Supplemental Figure 1**).

In observed diets, meat was an important contributor to bioavailable iron (43%), bioavailable zinc (39%), vitamin B6 (27%) and vitamin A (23%) intakes. Meat substitutes progressively replaced the contribution of meat to bioavailable iron and zinc intakes to the extent of their fortification. The optimized meat substitute was also effective at compensating the contribution of meat to vitamin B6 intake. However, meat substitutes were not able to compensate for the important contribution of processed meat to vitamin A intake, and this compensation was indeed rather achieved by an increase in offal in all scenarios. Meat contribution to LA intakes in observed diets (15%) was completely compensated in modeled diets by meat substitutes (which became important contributors – between 17 and 25%). For sodium and saturated fatty acids, for which observed intakes were above upper levels and needed to be lowered in the modeled diets, meat substitutes were poor contributors, except average meat substitute that brought a substantial contribution to sodium intake (~13-14%).

Finally, meat did not contribute to intakes of ALA, vitamin C and fiber in observed diet but meat substitutes became important contributors of these nutrients as they were introduced in the diet. Particularly, the optimized meat substitute brought substantial amounts of ALA, fiber and vitamin

C to the modeled diets (with contributions of 43%, 36% and 20%, respectively, in the OS-50% scenario).

Discussion

In this diet optimization study, we have shown that plant-based meat substitutes can be good nutritional levers for designing healthier dietary patterns if they have been formulated to convey the relevant nutrients and they are fortified with iron and zinc. We have indeed shown that the average meat substitute currently available is ineffective in rearranging the diet for improving its quality whereas a meat substitute that has been nutritionally designed (*Article n°6*) is largely used as a lever for healthier patterns. Fortifying any substitute with iron and zinc increase their utility as nutritional levers.

We have shown that without fortification, the average meat substitute did not present a sufficiently interesting nutrient composition to be a nutritional lever, since it was not significantly introduced in the modeled diet. The fortification with iron and zinc allowed its introduction along with important reductions in red meat, processed meat and poultry intakes. Overall, our findings are in line with those of Mertens et al. who observed that the theoretical fortifications in iron and some vitamins (B1, B2, B3 and B12) led to higher amounts of meat substitutes and lower amounts of meat in modeled diets compared to modeled diets with non-fortified meat substitutes (17). In addition to the low iron and zinc content of the average meat substitute, the introduction of the average substitute may have limited by its relatively high sodium content, since sodium intake was initially excessive in observed diets. High levels of sodium in plant-based meat substitutes have been highlighted (22) and with respect to the detrimental effect of excessive sodium intake (9), the reduction of sodium content in plant-based meat substitute should be considered.

In scenarios were both substitutes were added to the repertoire, the optimized meat substitute was always more useful, even when fortifications led to the same level of iron and zinc in the average and optimized substitutes. As compared to the average meat substitute, the optimized meat substitute was also introduced in higher quantities along with much higher reduction in red meat intake. Indeed, this meat substitute has been previously optimized to improve global nutrient adequacy, with ingredients being rich in nutrients that are currently insufficiently consumed (*Article n°6).* In this regard, it is not surprising that it proved to be useful when modeling healthier diets, but it finally contrasted dramatically with the average available market substitute.

Like its low sodium content, the high contents in iron and zinc (before fortification) of the optimized meat substitute were important in its utility. The nutritional requirements for bioavailable zinc and iron and the sodium intake limit were indeed the most active and limiting constraints that had the greatest impact on the composition of the modeled diets whatever the scenario. Another advantage of the optimized substitute was its higher content in fiber and ALA, whose intakes were also identified as limiting when using the average meat substitute.

Interestingly, with the optimized meat substitute as with the average meat substitute, iron and zinc fortifications were necessary to elicit a substantial decrease or near elimination of red meat. Iron and zinc absorptions are generally lower with plant-based than animal-based foods, in particular

because of the level of phytate that is a very limiting factor for their absorption. This makes more difficult to use plant-based products and compensate for these nutrients largely provided by animal products (37,38). Fortifications in iron and zinc seems indeed necessary to level beef, but not chicken, nutritional composition when modeling meat substitutes (39).

In addition, we found that the utilization of meat substitutes did not result in similar changes in meat consumption across meat types. While pork, poultry and processed meat were readily reduced, or even removed, beef reduction required the fortification of meat substitutes. In contrast, offal consumption increased in all scenarios, although from a very low observed intake. Offal are very rich in nutrients (40) and we can assume that while the optimization procedure drives towards the reduction of red meat, meats that are the most nutrient-dense are favored.

One important finding of this study is that although zinc and iron contents were critical characteristics of meat substitute to favor meat reduction, composition in other nutrients was also important to model healthy dietary patterns. Indeed, one advantage of plant-based meat substitutes is that they can contribute to intake of nutrients other than those conveyed by meat, although the nutritional composition of plant-based meat substitutes greatly varies according to their ingredient composition (20,41). When formulating meat substitutes, the choice of ingredients may be more driven by the willingness to reproduce the appearance and taste of meat (2,42), as it is important element for consumer's acceptance (43), rather than the nutritional quality of the meat substitute, whose consideration seems to be limited to macronutrient content and especially protein content (41,42).

Thus, if plant-based meat substitutes are well nutritionally-designed (especially in zinc and iron) they could be useful to favor healthier dietary patterns, by bringing nutrients provided by meat and by plant ingredients while limiting deviation from observed diets, that is, limiting the extent of the other changes in the diet that are not directly related to the health value of the diet. Compared to the average meat substitute, higher introduction of the optimized meat substitute led to a lower deviation from observed diets. We considered in this study that replacing meat with meat substitute would not count for a deviation from observed diets (as we did for wholegrain products replacing refined grains), since meat substitutes are designed to be consumed in the same way as meat (3,44). However, replacing meat with meat substitutes was not the only change in modeled diets, and it will not be sufficient to achieve healthy and sustainable diets (17). Indeed, if initial dietary pattern is unhealthy, replacing meat with meat substitute will not be sufficient to reach an healthier diet (18), which actually requires large direct and indirect changes in the diet pattern. Here we found that the utility of well nutritionally-designed meat substitutes stems from their joint effect on increasing the health value of the diet and lowering the requirement for other indirect dietary changes. This is because the better intrinsic nutritional quality of such optimized meat substitutes induces less required changes in the consumption of other food groups to ensure that nutritional requirements are met.

Because of their nutrient package, meat substitute can be integrated in high amounts and largely replace meat, but this may raise other questions about other potential adverse effects. Many plant-based meat substitutes are ultra-processed (2,19,41) and they would replace foods that are generally minimally processed (except processed meat). An excessive intake of ultra-processed foods is expected to have adverse effects on health (45–47). Therefore, meat substitutes may

appear effective to design healthier dietary patterns if the objective is to stay close to observed diets but may be ineffective if the objective is to promote the consumption of minimally processed foods that are currently poorly consumed (such as legumes and nuts) – for this latter objective it would certainly be necessary to deviate to a greater extent from the observed diets. In this perspective, the optimized meat substitute may however be considered, rather than a processed food, as a food regrouping together ingredients that could be integrated separately in the diet (coco bean, yellow sweet pepper, flaxseed, etc.), inasmuch as simple ingredients are used in its composition (*Article n°6*). The advantage of the formulation as a meat substitute is to offer an easy substitution to meat.

This work has some limitations. First, we took as the average meat substitute the mean of 43 meat substitutes that have very diverse nutritional compositions (some of them containing egg or cheese), but using an average substitute was required to avoid increasing the number of scenarios. Regarding the optimization procedure, optimizing at the population level did not take into account the diversity of diets that may be important when modeling healthier diets (48). Finally, most results presented in this study were obtained by considering as a nutritional constraint for bioavailable zinc and iron the observed levels rather than the recommended levels of intake. Using zinc and iron references are very constraining and limit the modeling of healthy diets (28) but removing these constraints may have led to much lower intakes of iron and zinc. Therefore, we chose as a compromise to not degrade the current situation and model diets providing at least the same levels of absorbed iron and zinc than observed diets. Using recommendations rather than observed intakes led to the same conclusions, at the exception that fortifications with iron and zinc appeared much more necessary.

To conclude, current standard meat substitutes are little useful to model healthy dietary patterns unless fortified with iron and zinc. On the contrary, a meat substitute that was nutritional designed proved to be an efficient lever to improve observed diets, but iron and zinc fortifications were needed so as to drastically reduce red meat consumption. Finally, plant-based meat substitutes may be useful to implement healthier dietary patterns with lower red meat consumption provided that they contain enough iron and zinc. Formulation of meat substitute should consider their nutritional quality and choose ingredients that are both sodium-low and nutrient-dense, and especially rich in iron and zinc. Fortifications should also be considered when seeking to design products aiming to fully substitute red meat.

Acknowledgments and statement of authors' contributions to manuscript

The authors would like to thank the Nutritional Epidemiology Research Team (EREN) at Université Paris 13, France for providing the nutritional compositions of plant-based substitutes extracted from the food composition table of the NutriNet-Santé Study.

MS, HF and FM: designed the research; HF: conducted the research; HF, MS and FM analyzed data; AD, J-FH and EK-G provided methodological support; MS wrote the first draft of the manuscript and all authors provided critical comments on the manuscript. MS, HF and FM had primary responsibility for the final content and all authors have read and approved the final manuscript.

References

1. Choudhury D, Singh S, Seah JSH, Yeo DCL, Tan LP. Commercialization of Plant-Based Meat Alternatives. Trends in Plant Science 2020;25:1055–8.

2. Boukid F. Plant-based meat analogues: from niche to mainstream. Eur Food Res Technol 2020;1–12.

3. Schösler H, Boer J de, Boersema JJ. Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution. Appetite 2012;58:39–47.

4. Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, Garnett T, Tilman D, DeClerck F, Wood A, et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. Lancet 2019;393:447–92.

5. Springmann M, Wiebe K, Mason-D'Croz D, Sulser TB, Rayner M, Scarborough P. Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: a global modelling analysis with country-level detail. The Lancet Planetary Health 2018;2:e451–61.

6. Notarnicola B, Tassielli G, Renzulli PA, Castellani V, Sala S. Environmental impacts of food consumption in Europe. Journal of Cleaner Production 2017;140:753–65.

7. Crippa M. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. 2021;2:12.

8. Gerber PJ, Food and Agriculture Organization of the United Nations, editors. Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013. 115 p.

9. Afshin A, Sur PJ, Fay KA, Cornaby L, Ferrara G, Salama JS, Mullany EC, Abate KH, Abbafati C, Abebe Z, et al. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. The Lancet 2019;393:1958–72.

10. Dietary Guidelines Advisory Committee. Scientific Report of the 2020 Dietary Guidelines Advisory Committee: Advisory Report to the Secretary of Agriculture and the Secretary of Health and Human Services [Internet]. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service; 2020. Available from: https://www.dietaryguidelines.gov/sites/default/files/2020-07/ScientificReport_of_the_2020DietaryGuidelinesAdvisoryCommittee_first-print.pdf

11. Dietitians Association of Australia. A modelling system to inform the revision of the Australian guide to healhy eating [Internet]. Australia: Department of Health and Ageing and National Health and Medical Research Council; 2011. Available from: https://www.eatforhealth.gov.au/sites/default/files/files/public_consultation/n55a_dietary_guidelines_food_modelling_111216.pdf

12. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Actualisation des repères du PNNS : révision des repères de consommations alimentaires [Internet]. Maisons-Alfort, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).; 2016. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf

13. Mariotti F, Havard S, Morise A, Nadaud P, Sirot V, Wetzler S, Margaritis I. Perspective: Modeling Healthy Eating Patterns for Food-Based Dietary Guidelines—Scientific Concepts, Methodological Processes, Limitations, and Lessons. Adv Nutr 2021;nmaa176.

14. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles [Internet]. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses).; 2016. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf

15. Fischer CG, Garnett T, University of Oxford, Food Climate Research Network, Food and Agriculture Organization of the United Nations. Plates, pyramids, and planets: developments in national healthy and sustainable dietary guidelines : a state of play assessment [Internet]. 2016 [cited 2021 Apr 27]. Available from: http://www.fao.org/3/a-i5640e.pdf

16. Cocking C, Walton J, Kehoe L, Cashman KD, Flynn A. The role of meat in the European diet: current state of knowledge on dietary recommendations, intakes and contribution to energy and nutrient intakes and status. Nutr Res Rev 2020;33:1–9.

17. Mertens E, Biesbroek S, Dofková M, Mistura L, D'Addezio L, Turrini A, Dubuisson C, Havard S, Trolle E, Geleijnse JM, et al. Potential Impact of Meat Replacers on Nutrient Quality and Greenhouse Gas Emissions of Diets in Four European Countries. Sustainability 2020;12:6838.

18. Hu FB, Otis BO, McCarthy G. Can Plant-Based Meat Alternatives Be Part of a Healthy and Sustainable Diet? JAMA 2019;322:1547.

19. Wickramasinghe K, Breda J, Berdzuli N, Rippin H, Farrand C, Halloran A. The shift to plant-based diets: are we missing the point? Global Food Security 2021;29:100530.

20. Fresán U, Mejia MA, Craig WJ, Jaceldo-Siegl K, Sabaté J. Meat Analogs from Different Protein Sources: A Comparison of Their Sustainability and Nutritional Content. Sustainability 2019;11:3231.

21. Salomé M, Huneau J-F, Le Baron C, Kesse-Guyot E, Fouillet H, Mariotti F. Substituting Meat or Dairy Products with Plant-Based Substitutes Has Small and Heterogeneous Effects on Diet Quality and Nutrient Security: A Simulation Study in French Adults (INCA3). J Nutr 2021;nxab146.

22. Curtain F, Grafenauer S. Plant-Based Meat Substitutes in the Flexitarian Age: An Audit of Products on Supermarket Shelves. Nutrients 2019;11:2603.

23. Phillips SM, Fulgoni VL, Heaney RP, Nicklas TA, Slavin JL, Weaver CM. Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. Am J Clin Nutr 2015;101:1346S-1352S.

24. Dubuisson C, Dufour A, Carrillo S, Drouillet-Pinard P, Havard S, Volatier J-L. The Third French Individual and National Food Consumption (INCA3) Survey 2014–2015: method, design and participation rate in the framework of a European harmonization process. Public Health Nutr 2019;22:584–600.

25. Henry C. Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. Public Health Nutr 2005;8:1133–52.

26. Black A. Critical evaluation of energy intake using the Goldberg cut-off for energy intake:basal metabolic rate. A practical guide to its calculation, use and limitations. Int J Obes 2000;24:1119–30.

27. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016 [Internet]. 2016. Available from: https://ciqual.anses.fr/

28. Dussiot A, Fouillet H, Wang J, Salomé M, Huneau J-F, Kesse-Guyot E, Mariotti F. Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc. Soumis.

29. Anses. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « Actualisation des références nutritionnelles françaises en vitamines et minéraux » ; saisine n°2018-SA-0238. Saisine liée n°2012-SA-0103. [Internet]. 2021. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2018SA0238Ra.pdf

30. Hallberg L, Hulthén L. Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. Am J Clin Nutr 2000;71:1147–60.

31. Armah SM, Carriquiry A, Sullivan D, Cook JD, Reddy MB. A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults. J Nutr 2013;143:1136–40.

32. Miller LV, Krebs NF, Hambidge KM. A Mathematical Model of Zinc Absorption in Humans As a Function of Dietary Zinc and Phytate. J Nutr 2007;137:135–41.

33. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2020 [Internet]. 2020. Available from: https://ciqual.anses.fr/

34. Etude NutriNet-Santé. Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database). Paris: Economica; 2013.

35. European Commission. Regulation (EU) No 1169/2011 of the European Parliament and of the Council of 25 October 2011 on the provision of food information to consumers. Off J Eur Union 2011;18–63.

36. Mausser H. Normalization and other topics in multi-objective optimization. Fields-MITACS Industrial Problems Workshop. 2006. p. 89.

37. Hunt JR. Bioavailability of iron, zinc, and other trace minerals from vegetarian diets. The American Journal of Clinical Nutrition 2003;78:633S-639S.

38. van Vliet S, Kronberg SL, Provenza FD. Plant-Based Meats, Human Health, and Climate Change. Frontiers in Sustainable Food Systems 2020;4:17.

39. Van Mierlo K, Rohmer S, Gerdessen JC. A model for composing meat replacers: Reducing the environmental impact of our food consumption pattern while retaining its nutritional value. J Clean Prod 2017;165:930–50.

40. Williams P. Nutritional composition of red meat. Nutrition & Dietetics 2007;64:7.

41. Bohrer BM. An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products. Food Sci Hum Wellness 2019;8:320–9.

42. Kyriakopoulou K, Dekkers B, van der Goot AJ. Plant-Based Meat Analogues. Sustainable Meat Production and Processing. [Internet] Elsevier; 2019 [cited 2019 Jul 9]. p. 103–26. Available from: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128148747000067

43. Weinrich R. Opportunities for the Adoption of Health-Based Sustainable Dietary Patterns: A Review on Consumer Research of Meat Substitutes. Sustainability 2019;11:4028.

44. Elzerman JE, Hoek AC, van Boekel MAJS, Luning PA. Consumer acceptance and appropriateness of meat substitutes in a meal context. Food Quality and Preference 2011;22:233–40.

45. Monteiro CA, Cannon G, Lawrence M, Costa Louzada ML, Pereira Machado P. Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system. Rome: FAO; 2019.

46. Lane MM, Davis JA, Beattie S, Gómez-Donoso C, Loughman A, O'Neil A, Jacka F, Berk M, Page R, Marx W, et al. Ultraprocessed food and chronic noncommunicable diseases: A systematic review and meta-analysis of 43 observational studies. Obesity Reviews [Internet] 2021 [cited 2021 Apr 5];22. Available from: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/obr.13146

47. Chen X, Zhang Z, Yang H, Qiu P, Wang H, Wang F, Zhao Q, Fang J, Nie J. Consumption of ultra-processed foods and health outcomes: a systematic review of epidemiological studies. Nutr J 2020;19:86.

48. de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F. The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. J Nutr 2019;149:488–96.

Supplementary Data.

Supplemental Method 1. Implementation of an alternative optimization procedure using current recommendations, rather than observed intakes, for the nutritional constraints on bioavailable iron and zinc (1).

In addition to the primary optimization procedure where nutritional constraints for bioavailable iron and zinc were based on observed levels in men and women, an alternative optimization procedure was run with nutritional constraints based on nutrient reference values for bioavailable zinc and iron. In this case, the women population was duplicated and different reference values were applied for bioavailable iron. Indeed, approximately 20% of women have “high” iron requirements (women Fe-) due to menstrual losses and therefore the nutrient reference value is higher for these women than for women with “low-to-medium” iron requirements (women Fe+) (2). As for the primary optimization procedure, modeled diets in men, women Fe- and women Fe+ were gathered to derive optimized diets at the population level by weighting each sub-population by its relative contribution in the whole population (50% of men and 50% of women, of which 20% of women Fe+ and 80% of women Fe-).

The following table resumes differences in nutritional constraints (lower bounds) between the primary optimization procedure (“Observed intakes”) and the alternative optimization procedure based on reference values for bioavailable iron and zinc (“Actual requirements”).

	“Observed intakes” optimization		“Actual requirements” optimization	
	Men	Women	Men	Women
Bioavailable iron (g/day)	1.68	1.21	1.72	1.72 / 2.52[1]
Bioavailable zinc (g/day)	3.57	3.15	3.63	3.23

[1]1.72mg/day applied to women with “low-to-medium” iron requirements (women Fe-) while 2.52mg/day applied to women with “high” iron requirements (women Fe+)

Supplemental Table 1. Food groups gathering food items consumed in the INCA3 study.

Food category	Food groups (Number of food items per food group)
Fruits and vegetables	Vegetables (149) Fresh fruits (50) Dried fruits (9) Processed fruits: compotes and cooked fruits (13) Nuts, seeds and oleaginous fruits (23)
Starches	Bread and refined bakery products (36) Other refined starches (13) Complete and semi-complete bread and bakery products (15) Other complete and semi-complete starches (11) Starch-based products, sweet/fat processed (61) Salt/fat processed starch products (15) Potatoes and other tubers (20)
Legumes	Legumes (16)
Meats, Processed meats, Fish products, Eggs	Poultry (24) Beef and veal (40) Pork and other meats (39) Offal (19) Processed meats (71) Oily fishes (32) Other fishes (55) Molluscs and crustaceans (21) Eggs and egg-based dishes (14)
Milk and dairy products	Milk (15) Fresh natural dairy products (18) Fresh sweetened dairy products (39) Sweet milky desserts (22) Cheeses (98)
Soups and Bouillons	Soups (30) Bouillons (8)
Sweet products or Sweet and fatty products	Sweet products or Sweet and fatty products (198)
Added fats and oils	Animal fats and assimilated fats (4) Butters and light butters (11) Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid (4) Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid (24) Sauces and fresh creams (55)
Substitutes of animal products	Substitutes of animal products (9)
Salt	Salt (6)
Condiments	Condiments (13)
Aromatic herbs, Spices except salt	Aromatic herbs, Spices except salt (38)
Other foods	Other foods (14)
Drinking waters	Drinking waters (44)
Hot drinks	Hot drinks (22)
Alcohol-free soft drinks	Sweetened soda type drinks (45) Fruit juices (29)
Alcoholic drinks	Alcoholic drinks (41)

Supplemental Table 2. Nutritional constraints applied in the optimization procedure. Lower and upper bounds are based on nutrient reference values from the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety (Anses) (2).

Nutrients	Units (/day)	Lower bounds[1]		Upper bounds[2]	
		Men	Women	Men	Women
Energy intake	kcal	2470	1995	2730	2205
Retinol	µg	-	-	3000	3000
Vitamin A	µg	750	650	-	-
Vitamin B1	µg/kcal	0.418	0.418	-	-
Vitamin B2	mg	1.6	1.6	-	-
Vitamin B3	mg/kcal	0.0067	0.0067	900	900
Vitamin B5	mg	3.77	3.22	-	
Vitamin B6	mg	1.7	1.6	25	25
Vitamin B9	µg	330	330	-	-
Vitamin B12	µg	4	4	-	-
Vitamin C	mg	110	110	-	-
Vitamin D[3]	µg	-	-	100	100
Vitamin E	mg	5.28	4.37	-	-
Vitamin K1	µg	39.47	34.48	-	-
Calcium	mg	950	950	2500	2500
Copper	mg	1.07	0.89	5	5
Bioavailable iron[4]	mg	1.68	1.21	-	-
Iodine	µg	150	150	600	600
Magnesium	mg	253.5	194.6	-	-
Manganese	mg	1.99	1.52	-	-
Phosphorus	mg	550	550	-	-
Potassium	mg	3500	3500	-	-
Selenium	µg	70	70	300	300
Sodium	mg	1500	1500	2300	2300
Bioavailable zinc[4]	mg	3.57	3.15	25	25
Water	g	2500	2000	-	-
Saturated fatty acids	% EI	-	-	12%	12%
Lauric + myristic + palmitic acids	% EI	-	-	8%	8%
Linoleic acid	% EI	4%	4%	-	-
Alpha-linolenic acid	% EI	1%	1%	-	-
Linoleic acid / alpha-linolenic acid ratio	-	-		5	5
EPA+DHA	g	0.5	0.5	-	-
Sugar excluding lactose	g	-		100	100
Protein	g/kg bw	0.83	0.83	2.3	2.3
Fiber	g	30	30	-	-

[1]Lower bounds correspond to Population Reference Intake (PRI) or lowest value of the macronutrient reference intake range. For vitamins B5, E, K1, copper, magnesium and manganese, lower bounds correspond to the 5th percentile of consumption.
[2]Upper bounds correspond to Tolerable Upper Intake Level (UL) or highest value of the macronutrient reference intake range.
[3]For vitamin D, a lower bound was not applied as the current reference value is too elevated to be reached only with food intake.
[4]For bioavailable iron and zinc, lower bounds are based on observed intakes.
DHA, docosahexaenoic acid; EI, energy intake; EPA, eicosapentaenoic acid.

Supplemental Table 3. Constraints applied for each food group in the optimization model in men and women.

Food groups	Men			Women		
	Lower consumption limit (g/d)[1]	Prevailing diet (g/d)	Upper consumption limit (g/d)	Lower consumption limit (g/d)[1]	Prevailing diet (g/d)	Upper consumption limit (g/d)
Food groups with a dietary constraint						
Beef and veal	0	48	71*	0	28	71*
Pork and other meats	0	27		0	13	
Offal	0	4		0	1	
Processed meats	0	50	25	0	30	25
Sweetened soda type drinks	0	141	263*	0	140	263*
Fruit juices	0	80		0	67	
Food groups with acceptability constraints						
Vegetables	20	176	400	18	160	387
Fresh fruits	0	128	453*	0	107	453*
Dried fruits	0	1		0	1	
Processed fruits: compotes and cooked fruits	0	13		0	15	
Nuts, seeds and oleaginous fruits	0	3	20	0	2	14
Bread and refined bakery products	27	168	354*	10	115	316*
Complete and semi-complete bread and bakery products	0	11		0	15	
Starch-based products, sweet/fat processed	0	22	97	0	19	82
Salt/fat processed starch products	0	4	21	0	2	14
Other refined starches	0	98	276*	0	72	188*
Other complete and semi-complete starches	0	4		0	4	
Potatoes and other tubers	0	79	264	0	49	196
Legumes	0	13	86	0	6	43
Poultry	0	30	108	0	31	109
Oily fishes[2]	0	8	54	0	6	41
Other fishes[2]	0	22	110	0	15	80
Molluscs and crustaceans	0	5	28	0	4	26
Eggs and egg-based dishes	0	14	61	0	14	70
Milk	0	84	343	0	75	322
Fresh natural dairy products	0	31	138	0	33	143
Fresh sweetened dairy products	0	50	179	0	48	168
Sweet milky desserts	0	19	93	0	16	73
Cheeses	0	49	131	0	36	94
Animal fats and assimilated fats	1	1	1	0	0	0
Butters and light butters	0	10	33	0	10	30
Vegetable fats rich in ALA	0	0	32*	0	0	32*
Vegetable fats poor in ALA	0	12		0	10	
Sauces and fresh creams	0	35	118	0	32	100
Sweet products or Sweet and fatty products	9	103	251	9	83	215
Salt	0	1	4	0	1	4
Condiments	0	4	29	0	3	21
Aromatic herbs, Spices except salt	0	2	7	0	2	6
Soups	0	71	434	0	75	381
Bouillons	0	5	21	0	4	25
Other foods	4	4	4	2	2	2
Substitutes of animal products	3	3	3	5	5	5
Drinking waters	182	1007	-	75	929	-
Hot drinks	0	494	494	0	507	507
Alcoholic drinks	0	216	216	0	59	59
Liquids (Milk, Drinking waters, Sweetened soda type drinks, Fruit juices, Hot drinks, Soups, Bouillons)	1061	2098	3777	738	1857	3087
Constraints on meat substitution						
Substitutes of animal products + Average meat substitute + Optimized meat substitute groups[3]	-	-	149	-	-	149
Poultry + Beef and veal + Pork and other meats + Offal + Average meat substitute + Optimized meat substitute groups[4]	-	-	364	-	-	207

* These upper consumption limits correspond to coupled constraints for the mentioned groups (e.g. 71g/d is the maximum intake for Beef and veal/Pork and other meats and Offal groups gathered).

[1]Lower and upper consumption limits represent respectively the 5th and 95th percentiles of consumption of the food group in men and women (except for Animal fats and assimilated fats, Other foods and Substitutes of animal products whose consumptions have been imposed constant and equal to the observed intakes in the modeled diets, and for Hot and Alcoholic drinks for which the upper bound was set at the prevailing consumption).

[2]For fishes, additional constraints were set to take into account sustainable fish consumption and to limit exposure to contaminants. Total fish consumption was limited to 39g/day and oily fish consumption was limited to 26g/day.

[3]Upper consumption limit corresponds to the 99th percentile of consumption of Substitutes of animal products group in women (in order to have the same upper limit for men and women, the highest 99th percentile between men and women was chosen - the 99th percentile in men being 74g)

[4]Upper consumption limit corresponds to the 99th percentile of consumption of meat groups (Poultry, Beef and veal, Pork and other meats, Offal) in men and women.

Supplemental Table 4. List of plant-based meat substitutes used to create the average meat substitute, which has the mean nutritional composition of 43 plant-based meat substitutes available in the market.

Substitute name	Data-base of origin[1]
Tofu, plain	(3)
Tempeh	(3)
Soy protein, textured, rehydrated	(3)
Soy burger or vegetable escalope	(4)
Cereal burger with cheese (without soybean)	(3)
Cereal burger with vegetables (without soybean)	(3)
Plant-based burger or steak from wheat (seitan) and vegetables	(3)
Plant-based burger or steak from lentil, soybean and vegetables	(3)
Plant-based burger from red kidney bean	(5)
Plant-based burger from lentil	(5)
Plant-based burger or steak from soybean and cheese	(3)
Plant-based burger or steak from soybean and vegetables	(3)
Plant-based burger or steak from soybean, cheese and vegetables	(3)
Plant-based burger from soybean	(5)
Plant-based burger from soybean with curry #1	(5)
Plant-based burger from soybean with curry #2	(5)
Plant-based burger from soybean with tomatoes and sweet pepper #1	(5)
Plant-based burger from soybean with tomatoes and sweet pepper #2	(5)
Plant-based burger from soybean with herbs #1	(5)
Plant-based burger from soybean with herbs #2	(5)
Plant-based burger from soybean with vegetables #1	(5)
Plant-based burger from soybean with vegetables #2	(5)
Plant-based burger from soybean with tomatoes and basil #1	(5)
Plant-based burger from soybean with tomatoes and basil #2	(5)
Plant-based burger or steak from wheat and soybean (vegan)	(3)
Plant-based burger or steak from wheat and soybean (not vegan)	(3)
Plant-based burger from cereals and soybean	(5)
Plant-based sausage with wheat or seitan	(3)
Plant-based sausage with wheat	(5)
Plant-based sausage with tofu (vegan)	(3)
Plant-based sausage with tofu (not vegan)	(3)
Plant-based sausage with tofu	(5)
Falafel	(4)
Falafel, prepacked	(3)
Soy and wheat burger or bite (vegan)	(3)
Soy and wheat burger or bite (not vegan)	(3)
Plant-based ball with wheat and/or soybean	(3)
Wheat-based nuggets (wo soybean)	(3)
Soybean and wheat-based nuggets (not vegan)	(3)
Soybean and wheat-based nuggets (vegan)	(3)
Schnitzel, soybean and wheat-based (not vegan)	(3)
Schnitzel, soybean and wheat-based (vegan)	(3)
Schnitzel, soybean, wheat and cheese-based, cordon bleu-style	(3)

[1]Three nutritional composition databases were used to complete this list: CIQUAL French composition table version 2016 (4), version 2020 (3) and the NutriNet-Santé Study Food composition database (5)

Supplemental Table 5. Ingredient composition of the optimized meat substitute (*Article n°6*).

Ingredient	Quantity (g/100g)
Coco bean, boiled/cooked in water	41.6
Pepper, sweet, yellow, sautéed/pan-fried, without fat	15.0
Chick pea, boiled/cooked in water	5.8
Wheat bran	5.6
Flaxseed	5.0
Couscous (precooked durum wheat semolina), cooked, unsalted	5.0
Shiitake mushroom, dried	5.0
Wheat germ	4.4
Potato starch	3.9
Rapeseed oil	3.6
Sweet potato, cooked	2.7
Sunflower oil	1.4
Thyme, dried	1.0

Supplemental Table 6. Food groups consumption in observed and modeled diets and relative changes in consumption in the whole population, men and women[1].

	Whole population							Men							Women						
	Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets					
		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%
Food groups consumption (g/day):																					
Vegetables	168	245	209	239	205	223	208	176	260	214	252	211	224	212	160	229	203	226	199	221	203
Fruits	133	204	170	201	168	191	179	142	232	182	227	181	210	193	123	176	158	175	155	171	164
Legumes & nuts	12	16	11	16	11	13	12	16	21	13	22	14	16	16	8	10	8	10	8	10	8
Refined grains products	227	60	108	110	108	95	64	266	97	123	139	124	147	117	187	23	93	80	92	42	10
Whole grains products	17	167	101	109	103	123	155	15	133	91	90	94	89	114	19	201	111	127	111	157	196
Potatoes	64	79	65	81	64	78	67	79	100	77	101	76	97	81	49	57	53	60	52	59	53
Average meat substitute	-	1	0	62	0	69	0	-	0	0	68	0	79	0	-	2	0	55	0	58	0
Optimized meat substitute	-	0	90	0	106	0	115	-	0	107	0	122	0	146	-	0	73	0	90	0	84
Red meat	61	60	49	49	35	27	6	79	71	71	71	58	48	7	42	49	26	27	11	5	4
Poultry	31	60	0	1	0	9	0	30	91	0	0	0	0	0	31	29	0	2	0	17	0
Processed meat	40	4	7	4	7	4	5	50	0	0	0	0	0	0	30	8	14	8	14	7	10
Seafood	30	40	39	40	38	34	33	35	42	43	43	42	31	35	25	37	34	36	33	36	31
Dairy products	221	254	248	265	245	244	230	233	254	256	278	248	234	233	208	254	239	252	242	254	226
Eggs	14	19	18	19	17	18	16	14	17	17	18	16	16	15	14	20	18	19	17	20	17
Animal fat	11	7	7	8	8	9	10	11	7	8	9	8	10	11	10	6	6	7	7	7	8
Vegetable fat	11	20	14	19	13	19	12	12	22	16	21	14	21	12	10	17	12	16	11	16	11
Miscellaneous foods	241	153	161	152	162	166	181	254	123	145	135	148	154	168	228	182	176	168	175	178	194
Soft drinks	214	104	78	104	69	114	93	221	71	40	68	31	87	64	207	137	115	140	106	141	122
Alcohol drinks	138	116	138	138	138	138	138	216	172	216	216	216	216	216	59	59	59	59	59	59	59
Hot beverages	501	501	501	272	501	442	385	494	494	494	37	494	376	262	507	507	507	507	507	507	507
Water	968	962	970	1070	969	947	1021	1007	1003	1009	1221	1005	979	1122	929	920	931	918	932	914	920
Relative changes compared to observed diet (%):																					
Vegetables		46%	24%	42%	22%	32%	24%		48%	22%	43%	20%	27%	20%		43%	27%	41%	24%	38%	27%
Fruits		54%	28%	52%	27%	44%	35%		63%	28%	60%	27%	48%	36%		43%	28%	42%	26%	39%	33%
Legumes & nuts		29%	-13%	33%	-8%	8%	0%		31%	-19%	38%	-13%	0%	0%		25%	0%	25%	0%	25%	0%
Refined grains products		-74%	-52%	-52%	-52%	-58%	-72%		-64%	-54%	-48%	-53%	-45%	-56%		-88%	-50%	-57%	-51%	-78%	-95%
Whole grains products		882%	494%	538%	503%	624%	812%		787%	507%	500%	527%	493%	660%		958%	484%	568%	484%	726%	932%
Potatoes		23%	2%	26%	0%	22%	5%		27%	-3%	28%	-4%	23%	3%		16%	8%	22%	6%	20%	8%
Red meat		-1%	-20%	-19%	-43%	-56%	-91%		-10%	-10%	-10%	-27%	-39%	-91%		17%	-38%	-36%	-74%	-88%	-90%
Poultry		97%	-100%	-97%	-100%	-72%	-100%		203%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%		-6%	-100%	-94%	-100%	-45%	-100%
Processed meat		-90%	-83%	-90%	-83%	-91%	-88%		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%		-73%	-53%	-73%	-53%	-77%	-67%
Seafood		32%	28%	32%	25%	12%	10%		20%	23%	23%	20%	-11%	0%		48%	36%	44%	32%	44%	24%
Dairy products		15%	12%	20%	11%	11%	4%		9%	10%	19%	6%	0%	0%		22%	15%	21%	16%	22%	9%
Eggs		32%	25%	32%	18%	29%	14%		21%	21%	29%	14%	14%	7%		43%	29%	36%	21%	43%	21%
Animal fat		-38%	-33%	-24%	-29%	-19%	-10%		-36%	-27%	-18%	-27%	-9%	0%		-40%	-40%	-30%	-30%	-30%	-20%
Vegetable fat		77%	27%	68%	14%	68%	5%		83%	33%	75%	17%	75%	0%		70%	20%	60%	10%	60%	10%
Miscellaneous foods		-37%	-33%	-37%	-33%	-31%	-25%		-52%	-43%	-47%	-42%	-39%	-34%		-20%	-23%	-26%	-23%	-22%	-15%
Soft drinks		-51%	-64%	-51%	-68%	-47%	-57%		-68%	-82%	-69%	-86%	-61%	-71%		-34%	-44%	-32%	-49%	-32%	-41%
Alcohol drinks		-16%	0%	0%	0%	0%	0%		-20%	0%	0%	0%	0%	0%		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Hot beverages		0%	0%	-46%	0%	-12%	-23%		0%	0%	-93%	0%	-24%	-47%		0%	0%	0%	0%	0%	0%
Water		-1%	0%	10%	0%	-2%	5%		0%	0%	21%	0%	-3%	11%		-1%	0%	-1%	0%	-2%	-1%

[1]Data from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3), n=1125 (561 men, 564 women).
AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction of the average meat substitute respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs.

Supplemental Table 7. Relative changes of consumption of red meat, poultry and processed meat versus observed diet in different scenarios of optimization in the whole population, men and women[1].

	Whole population							Men							Women						
	Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets					
		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%
Food groups consumption (g/day):																					
Red meat	61	60	49	49	35	27	6	79	71	71	71	58	48	7	42	49	26	27	11	5	4
Beef and veal	38	53	42	42	28	19	0	48	62	62	62	49	38	0	28	44	22	22	7	0	0
Pork and other meats	20	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0
Offal	3	7	7	7	7	8	6	4	9	9	9	9	10	7	1	5	4	5	4	5	4
Poultry	31	60	0	1	0	9	0	30	91	0	0	0	0	0	31	29	0	2	0	17	0
Processed meat	40	4	7	4	7	4	5	50	0	0	0	0	0	0	30	8	14	8	14	7	10
Relative changes compared to observed diet (%):																					
Red meat		-1%	-20%	-19%	-43%	-56%	-91%		-10%	-10%	-10%	-27%	-39%	-91%		+17%	-38%	-36%	-74%	-88%	-90%
Beef and veal		+39%	+11%	+11%	-26%	-50%	-100%		+29%	+29%	+29%	+2%	-21%	-100%		+57%	-21%	-21%	-75%	-100%	-100%
Pork and other meats		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Offal		+180%	+160%	+180%	+160%	+200%	+120%		+125%	+125%	+125%	+125%	+150%	+75%		+400%	+300%	+400%	+300%	+400%	+300%
Poultry		+97%	-100%	-97%	-100%	-72%	-100%		+203%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%		-6%	-100%	-94%	-100%	-45%	-100%
Processed meat		-90%	-83%	-90%	-83%	-91%	-88%		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%		-73%	-53%	-73%	-53%	-77%	-67%

[1]Data from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3), n=1125 (561 men, 564 women).
AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction of the average meat substitute respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs.

Supplemental Table 8. Optimization criteria (*Healthy Dietary pattern* and *Diet Departure*) values and dual values of the nutritional constraints in the different scenarios.

	Men							Women							Whole population						
	Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets					
		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%
Sub-functions of the objective function[1]:																					
Healthy Dietary pattern (*HDP*)	-3.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.2	0.9	-1.8	0.0	-0.1	0.2	0.1	0.6	0.6	-2.5	0.1	-0.1	0.1	0.2	0.4	0.7
HDP gain		*3.3*	*3.2*	*3.2*	*3.4*	*3.4*	*4.1*		*1.8*	*1.7*	*1.9*	*1.9*	*2.3*	*2.3*		*2.6*	*2.4*	*2.6*	*2.7*	*2.9*	*3.2*
Diet Departure (*DD*)	0.0	4.7	3.0	4.3	2.8	3.6	2.1	0.0	3.1	1.7	3.0	1.6	3.0	1.5	0.0	3.9	2.3	3.6	2.2	3.3	1.8
Dual of nutritional constraints[2]:																					
Bioavailable zinc		28.5	19.5	13.8	15.7	6.4	3.7		7.4	12.1	6.8	12.7	3.5	1.1							
Bioavailable iron		1.4	0.0	3.2	0.6	1.0	2.7		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0							
Potential value[3]		*10.1*	*5.9*	*10.1*	*5.9*	*3.6*	*3.6*		*2.8*	*3.1*	*2.8*	*3.1*	*0.8*	*0.0*							
Sodium		-8.6	-4.5	-10.6	-4.3	-9.2	-4.4		-7.4	-4.5	-8.3	-4.2	-8.4	-4.5							
SFA		-4.1	-4.4	-2.4	-3.4	-3.6	-0.6		-6.5	-5.9	-5.4	-5.1	-5.3	-4.5							
Vitamin A		2.7	2.3	2.6	2.0	3.1	1.5		4.3	3.2	4.4	2.7	4.6	3.5							
Iodine		0.0	0.0	2.7	0.0	0.4	0.0		5.1	1.6	4.5	1.3	5.4	2.3							
Fibers		7.0	0.0	5.1	0.0	0.5	0.0		3.8	0.0	3.3	0.0	2.2	0.0							
ALA		3.1	0.0	3.9	0.0	2.9	0.0		3.9	0.0	3.1	0.0	2.7	0.0							
Sugars without lactose		-0.8	0.0	-1.1	0.0	-1.1	0.0		-1.4	-0.8	-1.5	-0.8	-1.2	-0.6							
LA		2.5	2.0	0.0	1.2	0.0	0.0		0.0	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0							
Energy		0.0	0.9	1.6	0.4	7.9	0.4		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0							
Vitamin C		0.8	0.2	0.6	0.1	0.4	0.0		0.8	0.5	0.4	0.5	0.3	0.4							
Vitamin B6		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	1.4	0.0	1.4	0.0							
Water		0.0	0.0	1.1	0.0	0.0	1.2		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0							
EPA+DHA		0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1		0.3	0.2	0.2	0.1	0.2	0.1							
Vitamin B12		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3							

[1]Multi-criteria optimization consisted in maximizing the *Healthy dietary pattern* (*HDP*) criteria while minimizing the *Diet Departure* (*DD*) criteria. The *HDP* gain is calculated as the difference of *HDP* values between modeled and observed diets.
[2]Standardized dual values representing the potential effect of a 100% relaxation of the limiting bound of the considered constraint, for classifying the nutritional constraints from the most active (high absolute value) to the least active (close or equal to zero). Active constraints have a positive (negative) value if the lower (upper) bound is binding. Only nutrients with an active constraint (i.e. with a non-null dual value) in at least one scenario are presented here. For nutrients not presented in this table, dual values were always equal to zero, meaning that compliance with these constraints was not binding.
[3]Potential for the dual value of the bioavailable iron constraint, in case of removal of the bioavailable zinc constraint (the constraints on bioavailable zinc and iron worked together, but the most limiting constraint on zinc was so predominant that it often masked the influence of the iron constraint).
AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction of the average meat substitute respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs.
ALA; alpha-linolenic acid; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid; LA, linoleic acid.

Supplemental Table 9. Food groups consumption (g/day) in observed and modeled diets in the whole population, men, women with "low-to-medium" and "high" iron requirements using the alternative optimization procedure[1].

	Whole population						
	Observed diet	Modeled diets					
		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%
Vegetables	168	265	226	256	225	225	204
Fruits	133	197	166	191	167	192	173
Legumes & nuts	12	24	11	22	12	18	11
Refined grains products	227	77	111	90	103	108	109
Whole grains products	17	133	91	120	103	108	101
Potatoes	64	97	71	96	71	80	68
Average meat substitute	-	13	0	53	0	74	0
Optimized meat substitute	-	0	93	0	95	0	133
Red meat	61	71	65	71	63	59	14
Poultry	31	63	0	11	0	0	0
Processed meat	40	8	8	8	8	6	8
Seafood	30	49	49	47	46	36	42
Dairy products	221	269	258	283	252	237	248
Eggs	14	28	23	28	22	19	19
Animal fat	11	7	7	8	7	9	9
Vegetable fat	11	21	14	20	14	19	11
Miscellaneous foods	241	127	159	133	161	151	179
Soft drinks	214	118	108	122	104	126	121
Alcohol drinks	138	117	138	138	138	138	138
Hot beverages	501	247	247	4	247	375	131
Water	968	1020	995	1138	993	942	1042

	Men							Women with "low-to-medium" iron requirements							Women with "high" iron requirements						
	Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets					
		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%		AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%
Vegetables	176	265	213	247	212	220	210	160	235	204	235	204	222	191	160	387	378	387	378	264	222
Fruits	142	235	179	224	181	208	191	123	171	156	171	156	171	155	123	110	139	110	139	191	151
Legumes & nuts	16	31	12	27	13	23	14	8	15	10	15	10	13	8	8	27	13	27	13	12	8
Refined grains products	266	116	138	142	123	149	126	187	45	102	45	102	61	98	187	10	10	10	10	91	68
Whole grains products	15	106	67	80	92	80	99	19	182	110	182	110	150	104	19	76	131	76	131	77	97
Potatoes	79	105	76	103	76	99	79	49	66	61	66	61	58	58	49	178	81	177	81	73	56
Average meat substitute	-	0	0	81	0	90	0	-	25	0	25	0	39	0	-	26	0	26	0	134	0
Optimized meat substitute	-	0	113	0	117	0	146	-	0	57	0	57	0	115	-	0	136	0	136	0	136
Red meat	79	71	71	71	66	46	11	42	71	57	71	57	71	3	42	71	71	71	71	71	71
Poultry	30	104	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	31	109	0	109	0	0	0
Processed meat	50	0	0	0	0	0	0	30	13	13	13	13	11	13	30	25	25	25	25	12	25
Seafood	35	45	47	42	42	31	37	25	49	47	49	47	39	45	25	65	65	65	65	50	50
Dairy products	233	257	265	284	254	239	240	208	283	264	284	264	229	263	208	275	196	275	196	262	226
Eggs	14	18	17	18	16	16	15	14	29	23	29	23	21	22	14	70	51	70	51	29	25
Animal fat	11	7	7	9	8	10	11	10	7	6	7	6	7	8	10	6	6	6	6	9	7
Vegetable fat	12	23	16	21	15	21	12	10	18	13	18	13	17	11	10	22	8	22	8	18	10
Miscellaneous foods	254	120	143	132	146	152	165	228	158	196	158	196	168	201	228	39	93	39	93	81	161
Soft drinks	221	66	40	72	33	90	65	207	147	153	148	153	144	157	207	263	263	263	263	236	253
Alcohol drinks	216	174	216	216	216	216	216	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
Hot beverages	494	494	494	8	494	344	262	507	0	0	0	0	507	0	507	0	0	0	0	0	0
Water	1007	1002	1012	1238	1007	979	1122	929	898	937	898	938	906	961	929	1594	1142	1593	1141	905	964

[1] With iron and zinc lower constraints set at dietary reference intake instead of observed values; see Supplemental Method 1. Data from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3), n=1125 (561 men, 564 women). AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction of the average meat substitute respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs.

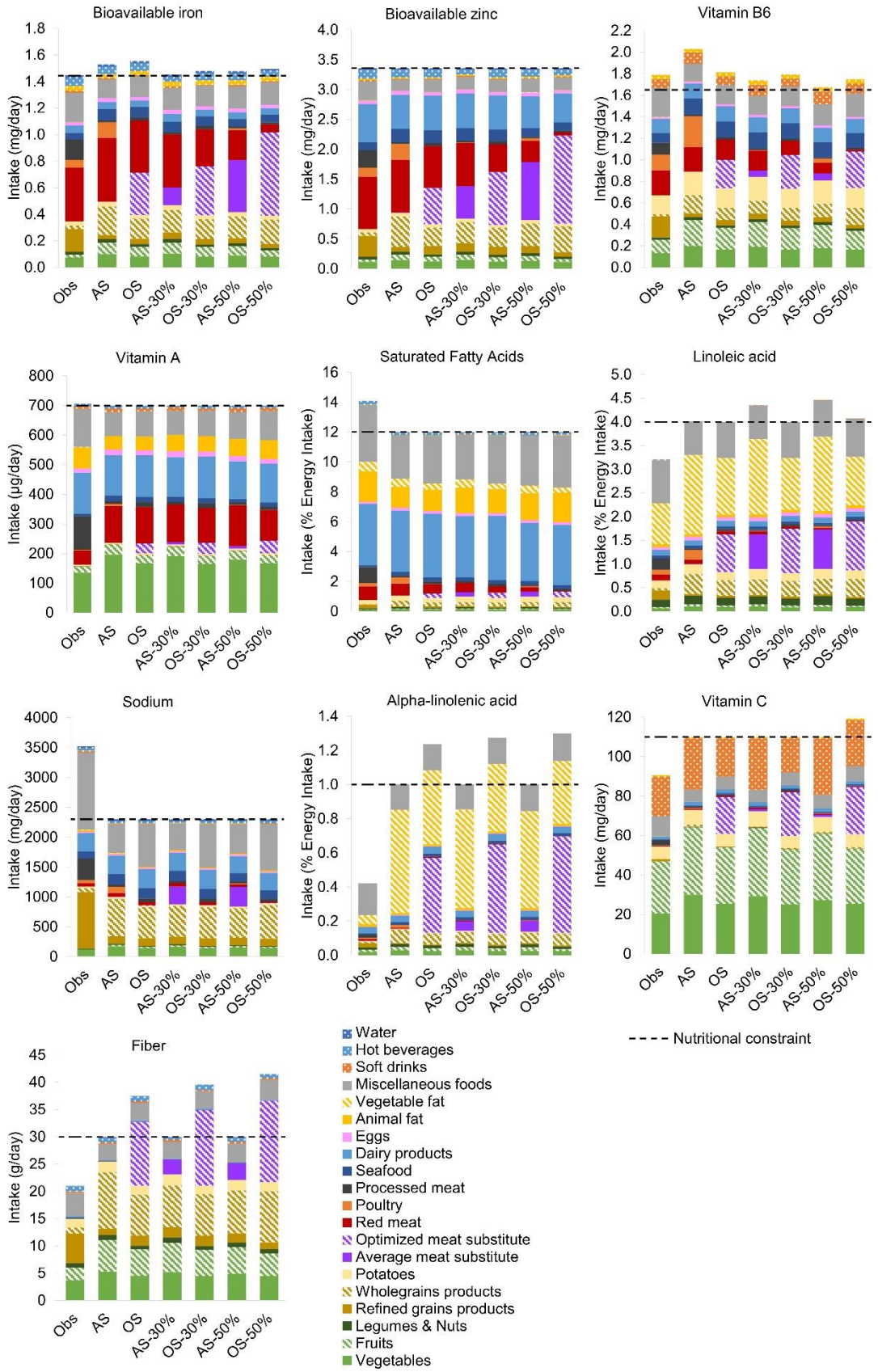
Supplemental Table 10. Relative changes of consumption of red meat, poultry and processed meat versus observed diet in different scenarios of optimization in the whole population, men, women with “low-to-medium” and “high” iron requirements using the alternative optimization procedure[1].

	Whole population					
	Modeled diets					
	AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%
Relative changes compared to observed diet (%):						
Red meat	+17%	+8%	+17%	+4%	-3%	-77%
Beef and veal	+62%	+51%	+61%	+44%	+33%	-78%
Pork and other meats	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Offal	+276%	+220%	+296%	+220%	+212%	+120%
Poultry	+106%	-100%	-64%	-100%	-100%	-100%
Processed meat	-81%	-81%	-81%	-81%	-86%	-81%

	Men						Women with “low-to-medium” requirements						Women with “high” iron requirements					
	Modeled diets						Modeled diets						Modeled diets					
	AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%	AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%	AS	OS	AS-30%	OS-30%	AS-50%	OS-50%
Relative changes compared to observed diet (%):																		
Red meat	-10%	-10%	-10%	-16%	-42%	-86%	+69%	+36%	+69%	+36%	+69%	-93%	+69%	+69%	+69%	+69%	+69%	+69%
Beef and veal	+31%	+29%	+29%	+19%	-25%	-92%	+139%	+89%	+139%	+89%	+136%	-100%	+18%	+86%	+18%	+86%	+125%	+125%
Pork and other meats	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Offal	+100%	+125%	+125%	+125%	+150%	+75%	+300%	+300%	+300%	+300%	+400%	+200%	+3700%	+1800%	+3700%	+1800%	+700%	+700%
Poultry	+247%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	+252%	-100%	+252%	-100%	-100%	-100%
Processed meat	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-57%	-57%	-57%	-57%	-63%	-57%	-17%	-17%	-17%	-17%	-60%	-17%

[1] With iron and zinc lower constraints set at dietary reference intake instead of observed values; see Supplemental Method 1. Data from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3), n=1125 (561 men, 564 women).

AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction of the average meat substitute respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs.


Bioavailable iron
Intake (mg/day)
Bioavailable zinc
Intake (mg/day)
Vitamin B6
Intake (mg/day)
Vitamin A
Intake (µg/day)
Saturated Fatty Acids
Intake (% Energy Intake)
Linoleic acid
Intake (% Energy Intake)
Sodium
Intake (mg/day)
Alpha-linolenic acid
Intake (% Energy Intake)
Vitamin C
Intake (mg/day)
Fiber
Intake (g/day)
Obs
AS
OS
AS-30%
OS-30%
AS-50%
OS-50%
Water
Hot beverages
Soft drinks
Miscellaneous foods
Vegetable fat
Animal fat
Eggs
Dairy products
Seafood
Processed meat
Poultry
Red meat
Optimized meat substitute
Average meat substitute
Potatoes
Wholegrains products
Refined grains products
Legumes & Nuts
Fruits
Vegetables
Nutritional constraint

Supplemental Figure 1. Contribution of foods groups to nutrient intakes in observed and modeled diets. Obs, observed diet. AS, AS-30%, AS-50%, modeled diets with the introduction of the average meat substitute respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. OS, OS-30%, OS-50%, modeled diets with the introduction of average and optimized meat substitutes respectively not fortified, fortified with iron and zinc at 30% and 50% of the NRVs. The dashed line represents the constraint for the selected nutrient (lower bound, except for sodium and SFA that are upper bounds). For bioavailable iron, bioavailable zinc, vitamin B6, vitamin A, constraints are represented as the mean between the constraint for men and for women. For other nutrients, constraints are similar between sexes. See Supplemental Table 2 for the value of the constraints.

References

1. Dussiot A, Fouillet H, Wang J, Salomé M, Huneau J-F, Kesse-Guyot E, Mariotti F. Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc. Soumis.

2. Anses. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « Actualisation des références nutritionnelles françaises en vitamines et minéraux » ; saisine n°2018-SA-0238. Saisine liée n°2012-SA-0103. [Internet]. 2021. Available from: https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2018SA0238Ra.pdf

3. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2020 [Internet]. 2020. Available from: https://ciqual.anses.fr/

4. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016 [Internet]. 2016. Available from: https://ciqual.anses.fr/

5. Etude NutriNet-Santé. Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database). Paris: Economica; 2013.

CHAPITRE III

–

DISCUSSION

CHAPITRE III : DISCUSSION

1. Discussion générale

L'objectif de cette thèse était d'étudier le rôle des aliments sources de protéines végétales dans une transition protéique à la faveur des protéines végétales à l'échelle de la population française. Ce travail se place dans le contexte de régimes alimentaires occidentaux actuels peu durables et d'une diminution de la consommation de produits animaux au profit des produits végétaux, encouragée à la fois pour des raisons environnementales et de santé. Pour mener ce travail, divers aliments ont été étudiés tels que les aliments issus de la filière oléo-protéagineuse (soja, légumes secs, graines, …) et les aliments issus de leur transformation qui sont considérés comme des substituts végétaux à la viande, au lait ou aux desserts lactés. Dans un premier temps, un état des lieux de la consommation de protéines animales et végétales a été réalisé. Puis, des régimes alimentaires ont été modélisés en remplaçant les produits animaux par divers produits végétaux. Finalement, des études d'optimisation ont été menées pour évaluer comment améliorer la qualité nutritionnelle des substituts de viande, et évaluer leur place dans une alimentation plus saine.

Les résultats présentés dans cette thèse ont déjà fait l'objet de discussions dans les articles et l'objectif de cette partie est d'aborder l'ensemble des méthodes et résultats de cette thèse de manière transversale. Quatre principaux aspects seront abordés : 1) les aspects méthodologiques de la thèse, 2) la caractérisation nutritionnelle des substituts végétaux, 3) les impacts d'un rééquilibrage des apports protéiques sur des critères nutritionnels et de santé, 4) la place potentielle des substituts végétaux dans une alimentation durable.

- **Discussion des aspects méthodologiques de la thèse**

Les données de l'étude INCA3 utilisées dans ce travail datent de 2014-2015 et il est possible que les consommations alimentaires aient évolué depuis. En effet, la consommation de viande, et plus particulièrement celle de porc et de ruminant, tend à diminuer depuis plusieurs années (FranceAgriMer, 2020; Tavoularis & Sauvage, 2018) et entre 2015 et 2017, le pourcentage d'individus déclarant limiter leurs consommations de protéines animales est passé de 25% à 34% (Kantar WorldPanel, 2017). De plus, il y a une tendance à végétaliser son alimentation car entre 2010 et 2019, le CRÉDOC a observé une augmentation de la consommation de fruits (+20g/jour) et légumes (+5g/jour) chez les adultes (Seconda, Salmon Legagneur, et al., 2021) et selon le dernier baromètre consommateurs du GEPV (Groupe d'Etude et de Promotion des Protéines Végétales) et de Protéines France menée en 2020, les français ont une meilleure appréciation des protéines végétales que les années précédentes et sont une majorité à considérer que les protéines végétales sont meilleures pour la santé et pour l'environnement que les protéines animales (GEPV & Protéines France, 2020). Les données de l'étude INCA3 présentent cependant l'avantage d'être les données les plus récentes sur un échantillon représentatif de la population française, et nous pouvons supposer que bien que des changements alimentaires ait

certainement eu lieu depuis leur collecte, la structure globale des régimes alimentaires n'a pas dû être profondément modifiée. Ainsi, les résultats présentés dans cette thèse devraient rester transposable aux consommations actuelles.

Cependant, ces données nous ont semblé trop anciennes pour étudier la consommation de substituts végétaux dans la population, étant donné que ces produits constituent un marché dynamique avec une croissance récente et rapide. Dans l'étude INCA3, seuls 4% des individus avaient déclarés consommer des substituts végétaux sur les trois jours de recueils (Anses, 2017) alors que dans la dernière enquête IFOP pour FranceAgriMer de 2020, 23% des sondés déclaraient en consommer (Crouzet et al., 2021). Nous avions conduit une analyse préliminaire des consommateurs de substituts végétaux dans l'étude INCA3, mais du fait du faible échantillon de consommateurs et de l'évolution rapide de ce secteur, il ne semblait pas pertinent d'approfondir ce travail (données non rapportées). En revanche, dans nos travaux de simulations, nous avons pu utiliser une base récente de substituts végétaux avec une grande diversité de produits et un niveau de détail de composition nutritionnelle qui nous a permis de mener des analyses approfondies.

Au cours de cette thèse, nous avons utilisé différents indicateurs afin de caractériser l'alimentation. Le score PANDiet permet une mesure de l'adéquation globale des régimes en prenant en compte la majorité des nutriments pour lesquels il existe une recommandation nutritionnelle, et comprend à la fois un sous-score d'adéquation et un sous-score de modération. Cet indice est très complet mais présente toutefois certaines limites. Tout d'abord, étant donné qu'il y a moins de nutriments inclus dans le sous-score de modération que le sous-score d'adéquation, les probabilités d'adéquation du score de modération ont plus de poids que celles du score d'adéquation. De plus, au sein de chaque sous-score, les probabilités d'adéquation ont le même poids alors qu'une évolution de ces probabilités n'aurait pas nécessairement le même impact sur la santé en fonction du nutriment considéré. Des sous-scores d'adéquation similaires peuvent également masquer des profils d'adéquation très différents. C'est notamment ce que nous avons constaté dans l'article n°1 où la substitution des produits animaux avec un mélange diversifié d'aliments protéiques végétaux permettait de maintenir le sous-score d'adéquation mais avec des réarrangements entre les différentes probabilités d'adéquation qui forment ce sous-score. Afin de pallier ces limites, une pondération des nutriments pourrait être envisagée mais pour cela il faudrait pouvoir hiérarchiser puis quantifier « l'importance » de chaque nutriment, et on ne dispose pas de critère pour le faire. Il nous a semblé plutôt plus pertinent de développer un nouveau score qui permette de mesurer le risque de carence associé à une insuffisance d'apport en considérant uniquement les nutriments pour lesquels de telles carences sont répertoriées. Par rapport au PANDiet, le score SecDiet a ainsi permis de mettre en avant certains nutriments, qui n'auraient peut-être pas fait l'objet d'une attention particulière (par exemple, l'élévation du risque de carence en iode lors de la substitution des produits laitiers dans l'article n°4) mais également de nuancer certains résultats obtenus avec le PANDiet (par exemple, une diminution de la probabilité d'adéquation du PANDiet pour le zinc ne s'accompagnait pas toujours d'une augmentation du risque de carence). Dans l'article n°5 l'utilisation du SecDiet a également permis une approche complémentaire à l'estimation de la mortalité par le modèle PRIME afin de quantifier à la fois des risques à court/moyen et long-terme associés à des changements alimentaires.

Un autre aspect méthodologique sur lequel il semble intéressant de revenir est l'utilisation de la classification NOVA pour estimer le degré de transformation de l'alimentation. Cette classification a été utilisée dans de nombreux travaux de recherche (Monteiro, Cannon, Lawrence, et al., 2019), ce qui facilite les comparaisons entre les études. Cependant, l'application de cette classification et l'attribution d'un aliment à une des quatre catégories n'est pas toujours aisée. Par exemple, un produit transformé peut contenir des additifs s'ils sont utilisés pour améliorer sa conservation, mais si le produit contient d'autres additifs pour améliorer le goût, la couleur ou la texture, alors il sera considéré ultra-transformé (Monteiro, Cannon, Lawrence, et al., 2019; Monteiro, Cannon, Levy, et al., 2019). Pour un même produit, l'utilisation d'additifs peut notamment varier d'une marque à l'autre mais dans cette thèse l'application de la classification NOVA s'est uniquement basé sur le libellé de l'aliment et son mode de préparation (fait maison, produit industriel, …) sans considérer la marque. Dans le cas des substituts végétaux, certains produits sont plus transformés que d'autres mais l'ensemble des substituts (hors tofu et tempeh) ont été considérés ultra-transformés. Dans le cas des boissons et desserts végétaux, le niveau de transformation a pu être surestimé et plusieurs de ces produits (notamment les produits natures non enrichis) pourraient appartenir aux catégories peu transformés ou transformés. De plus, la catégorie « aliments ultra-transformés » regroupe une grande variété d'aliments, qui peuvent être considérés ultra-transformés de par le nombre et la nature des ingrédients, les procédés industriels et/ou la présence d'additifs. Cependant, on peut penser que ces différents critères n'ont pas les mêmes conséquences sur la qualité nutritionnelle des produits et leurs impacts sur la santé. De même, cette catégorie regroupe de nombreux aliments qui peuvent avoir des compositions nutritionnelles très diverses. Par exemple, avec la classification NOVA les substituts végétaux sont considérés au même niveau que des sodas ou des chips, alors qu'ils peuvent contribuer aux apports de certains nutriments importants (comme les fibres) alors que les autres produits sont riches en énergie mais avec une faible densité nutritionnelle. Ainsi, il pourrait être plus pertinent de développer des classifications alternatives qui distinguent mieux les produits en fonction du niveau de transformation et de la qualité nutritionnelle.

Finalement, bien que de nombreuses études ont montré des associations entre consommation de produits ultra-transformés et le risque de maladies non-transmissibles (Lane et al., 2021; Monteiro, Cannon, Lawrence, et al., 2019), les causes peuvent être multiples et encore mal définies (Lane et al., 2021; Poti et al., 2017; Srour & Touvier, 2021). En effet, la composition nutritionnelle de ces produits est souvent mise en cause, du fait de leurs teneurs en sel, sucre ou graisses saturées qui peuvent être élevées (Poti et al., 2017). Cependant, la composition nutritionnelle des produits n'est peut-être pas l'unique facteur explicatif et il est important de déterminer si d'autres facteurs, tels que la présence d'additifs, de composants néoformés pendant la production ou la migration de substances présentes dans les emballages en contact avec les aliments peuvent également être mis en cause (Srour & Touvier, 2021). Ces produits pourraient également favoriser la surconsommation énergétique du fait d'une grande palatabilité et d'une densité énergétique élevée (Hall et al., 2019; Poti et al., 2017). De plus, la consommation seule d'aliments ultra-transformés n'est peut-être pas suffisante pour expliquer les associations mais également d'autres facteurs associés à la consommation d'aliments ultra-transformés comme des comportements sédentaires ou diverses caractéristiques sociodémographiques (Poti et al., 2017). Finalement, le problème n'est pas uniquement la consommation de produits ultra-transformés mais que cette consommation détourne les consommateurs d'autres produits moins transformés

et considérés meilleurs pour la santé, tel que les fruits et les légumes (Lane et al., 2021; Monteiro, Cannon, Lawrence, et al., 2019). En effet, d'après les résultats de l'article n°2, le profil de consommation des forts consommateurs de produits ultra-transformés ne serait pas favorable pour la santé cardiométabolique à long-terme, du fait d'une consommation plus importante de charcuterie et de boissons sucrées mais également à cause d'une moindre consommation de fruits, légumes et fibres. Ainsi, bien que les relations entre consommation d'aliments ultra-transformés et santé semblent établies, des investigations sont encore nécessaires pour mieux comprendre les causes.

Enfin, une des limites méthodologiques de cette thèse est la modélisation de régimes alimentaires par la substitution de produits animaux par des produits végétaux. Bien que ces méthodes permettent d'étudier les impacts de changements alimentaires et de s'affranchir au moment des analyses de facteurs de confusion car les populations d'études sont identiques, on peut également reprocher le manque de réalisme des régimes modélisés. En effet, les régimes modélisés sont une simplification de ceux que les individus adopteraient effectivement s'ils décidaient de réduire leur consommation de produits animaux (Wickramasinghe et al., 2021). Dans les substitutions effectuées, l'ensemble de la viande, du lait ou des desserts lactés étaient remplacés mais un individu souhaitant réduire sa consommation de produits animaux ne remplacerait peut-être pas de la même manière un aliment en fonction de l'occasion de consommation ou du type d'aliment consommé. De même, le reste de l'alimentation, notamment les aliments accompagnant les produits substitués, n'a pas été modifiée. Par exemple, lorsqu'un yaourt nature était remplacé par un dessert végétal sucré, la consommation éventuelle de produits sucrants accompagnant le yaourt nature n'a pas été considéré, ce qui peut mener à une surestimation de la consommation de sucre. Lors de la substitution de la viande, les accompagnements (légumes, frites, …) n'ont également pas été modifié. En somme, nous n'avons pas tenu compte des relations de dépendance avec les autres aliments, car il n'existe pas d'information en la matière qui soit transposable à nos modèles, et que la modélisation de ces relations est un sujet de recherche à part entière. Cependant, ces méthodes de substitutions permettent d'évaluer avec un bon niveau de finesse l'impact de différents changements alimentaires et d'étudier quels seraient les changements alimentaires pris isolement qu'il conviendrait de privilégier ou d'éviter.

- **L'apport de cette thèse à la caractérisation de la qualité nutritionnelle des substituts végétaux**

Les substituts végétaux, parce qu'ils sont fait à base de produits végétaux, sont généralement considérés comme sains par les consommateurs (Wickramasinghe et al., 2021). Cependant, ces aliments peuvent être riches en acides gras saturés, sel ou sucre parfois à des niveaux similaires ou supérieurs à ce que l'on peut trouver dans les produits animaux (Bohrer, 2019; Vanga & Raghavan, 2018; Wickramasinghe et al., 2021). De plus, les substituts végétaux sont des produits relativement récents et il existe aujourd'hui une grande diversité de produits, en fonction des ingrédients utilisés mais également des procédés de fabrication et des enrichissements éventuels en nutriments. Ainsi, comme l'objectif de cette thèse était d'évaluer la place des aliments sources de protéines végétales dans le rééquilibrage des apports protéiques et que les substituts végétaux

sont généralement utilisés en remplacement des produits animaux, il semblait pertinent de caractériser l'impact de leur consommation sur la qualité de l'alimentation et de comparer les substituts entre eux.

La composition nutritionnelle des substituts végétaux à la viande ou au lait a déjà été étudié mais moins d'études se sont intéressées à l'impact de la consommation de ces substituts sur les apports nutritionnels d'une population. Pourtant, modéliser des régimes alimentaires où les substituts végétaux remplacent les produits animaux permet d'évaluer leurs impacts par rapport à la situation nutritionnelle initiale d'une population et à un niveau de consommation attendu de ces produits. Ce travail a été mené sur une population néerlandaise (Seves et al., 2017) et plus récemment sur une population anglaise (Farsi et al., 2021). Seves et al. ont substitué la viande et les produits laitiers et ont trouvé que cela conduisait à des apports plus faibles en protéines, acides gras saturés, calcium, zinc, vitamines A, B1 et B12 et des apports plus élevés en fibres, fer et vitamine D (Seves et al., 2017). Farsi et al. ont substitué uniquement la viande et ont abouti à des apports plus faibles en protéines, lipides, acides gras saturés et vitamine B12 et des plus élevés en fibres, sucres et sodium, et également en fer lorsque la viande est substituée par du tofu (Farsi et al., 2021). Bien que les méthodes de substitution diffèrent entre les différentes études, ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus dans les articles n°4 et 5, mais il faut prendre en compte que les résultats obtenus dans les différents pays dépendent à la fois de la situation nutritionnelle initiale de la population étudiée et de l'offre de substituts végétaux dans le pays.

La spécificité des études menées dans les articles n°4 et 5 est d'avoir évalué les apports en fer et zinc en prenant en compte leur biodisponibilité. En effet, Seves et al. ont montré que les apports en fer seraient plus élevés mais ont supposé que le fer serait moins bien absorbé car il serait sous la forme non-héminique et la présence de phytates dans les substituts végétaux pourrait limiter son absorption (Seves et al., 2017). En effet, dans l'article n°4, la substitution de la viande entraînait une diminution des probabilités d'adéquation pour le fer et zinc biodisponibles. Ainsi, le fait de considérer le régime dans son ensemble en effectuant des substitutions a permis de mieux prendre en compte la biodisponibilité de ces nutriments, qui n'aurait pas pu être possible en analysant seulement la composition nutritionnelle des substituts. Dans l'article n°5, l'estimation des impacts sur la mortalité prématurée de la substitution des produits animaux a également permis une nouvelle approche de l'évaluation des impacts de la consommation des substituts végétaux.

Un des objectifs de l'évaluation de la qualité nutritionnelle des substituts végétaux était de pouvoir comparer les substituts entre eux et cela a pu être réalisé dans l'article n°4 en modélisant autant de régimes de substitution que de substituts disponibles. Les substituts à base de soja semblent ainsi les plus adaptés pour remplacer les produits animaux, à l'inverse des substituts à base de céréales qui avaient tendance à dégrader la qualité de l'alimentation. Mais ce résultat est à mettre en regard des profils actuels de consommation de protéines végétales. En effet, l'article n°1 a permis de constater que les sources de protéines végétales étaient peu diversifiées et provenaient majoritairement des céréales. Remplacer la viande par un substitut à base de céréales augmente encore plus ce déséquilibre mais les résultats auraient pu être différent dans un contexte d'apports diversifiés en protéines végétales. Ainsi, les résultats de ces modélisations sont bien à interpréter dans le contexte actuel de consommations alimentaires.

Farsi et al. ont également constaté des impacts différents en fonction des ingrédients constitutifs des substituts végétaux et Fresán et al. avaient montré des différences de composition nutritionnelle en fonction des ingrédients utilisés dans les substituts de viande (Farsi et al., 2021; Fresán et al., 2019). Les résultats présentés dans l'article n°4, ainsi que ceux de la littérature, confirment l'importance de la composition en ingrédients des substituts végétaux pour leur qualité nutritionnelle. Le travail réalisé dans l'article n°6 a d'ailleurs permis d'approfondir cet aspect et d'étudier quels seraient les meilleurs ingrédients à inclure dans un substitut de viande pour qu'il remplace au mieux la viande dans le régime alimentaire des français.

Le travail présenté dans cette thèse permet ainsi d'enrichir la littérature, encore peu développée, sur les impacts de la substitution des produits animaux par des substituts végétaux. Les approches utilisées ont été diverses en évaluant la qualité de l'alimentation, le risque de carence et l'estimation de la mortalité prématurée évitée. Le travail d'optimisation développé dans l'article n°6 pourrait également servir de base scientifique pour l'amélioration de la qualité nutritionnelle des substituts de viande.

- **Implications nutritionnelles d'un rééquilibrage des apports protéiques et rôle des aliments sources de protéines végétales dans cette transition**

Les articles n°1 et 2 ont permis de mieux appréhender les consommations actuelles de protéines animales et végétales et les articles n°1, 4 et 5 ont permis d'étudier les impacts d'une transition protéique vers une part plus importante de protéines végétales, en utilisant différents aliments de substitution. Les impacts nutritionnels ont été évalués au moyen de l'adéquation des apports en nutriments par rapport aux besoins et au risque de carence et en évaluant la santé à long-terme avec le risque de mortalité par maladies non-transmissibles.

L'article n°1 a montré que dans la population française, environ 2/3 des protéines consommées étaient d'origine animale et que les protéines végétales étaient majoritairement (environ 50-60%) apportées par les céréales. Ces résultats sont assez cohérents avec ce que l'on peut retrouver dans la littérature en France et dans d'autres pays européens (Camilleri et al., 2013; Halkjær et al., 2009; Lin et al., 2011). La consommation de protéines végétales était associée à la qualité de l'alimentation mais à une moindre diversité des apports protéiques végétaux. L'article n°2 a permis d'identifier que la consommation de protéines était associée au degré de transformation de l'alimentation. Les forts consommateurs de produits transformés consommaient plus de protéines végétales mais avec un profil moins diversifié (plus de protéines issues de céréales) et bien qu'ils aient une alimentation de meilleure qualité du point de vue des apports en nutriments, ils avaient également un profil alimentaire associé à un risque de mortalité plus élevé. En effet, la consommation de protéines de céréales s'expliquait par une consommation plus importante de produits de panification raffinées mais ces individus consommaient également plus de fromage, charcuterie et boissons alcoolisées comparé à l'ensemble de la population. Ainsi, une consommation plus élevée de protéines végétales n'est pas toujours associée à un meilleur profil de consommation dans la population adulte française.

A l'inverse, les forts consommateurs de produits peu transformés consommaient plus de protéines animales, avec notamment une contribution plus importante de la viande rouge, de la volaille, du poisson et des yaourts et moins importante de la charcuterie et du fromage. A l'exception de la consommation de viande rouge, ce profil de consommation de produits animaux semble être à favoriser au vue des associations entre la consommation de ces groupes d'aliments et le risque de maladies chroniques (Anses, 2016b). En effet, dans l'article n°2 il a été observé qu'adopter un tel profil alimentaire permettrait d'éviter un certain nombre de morts comparé à une alimentation pauvre en produits peu transformés. Ces résultats suggèrent ainsi qu'une consommation de protéines animales au sein d'un profil alimentaire sain pourrait être favorable pour la santé à long-terme (Petersen et al., 2017). En effet, en plus de leur consommation de protéines animales, les forts consommateurs de produits peu transformés avaient des apports plus diversifiés en sources de protéines végétales et des consommations plus importantes de groupes d'aliments à favoriser (légumes, fruits, fruits à coque, céréales complètes …). Finalement, les forts consommateurs de produits ultra-transformés consommaient moins de protéines, comme cela a déjà été démontré dans d'autres études (Martínez Steele et al., 2018; Rauber et al., 2018).

Ainsi, d'après ces résultats, la consommation de protéines végétales semble être un marqueur de la qualité nutritionnelle de l'alimentation, mais la prise en compte de la nature des aliments protéiques végétaux consommés permet une approche plus juste et complète. Malik et al. avaient notamment montré à l'aide de modèles multivariables dans trois cohortes américaines que la substitution d'une portion de céréales raffinées ou d'une portion de pomme de terre par une portion d'aliments sources de protéines végétales (céréales complètes, légumineuses, fruits à coque) était associé à une réduction du risque de diabète de type 2 de respectivement 6% [95%CI 0,91-0,96] et 16% [95%CI 0,79-0,91] (Malik et al., 2016). Ainsi, il serait intéressant d'approfondir les relations entre les types de protéines végétales consommées et la qualité de l'alimentation et la santé. On pourrait notamment imaginer le développement d'un indice associant la quantité et la qualité des apports protéiques végétaux.

Les simulations de substitutions de produits animaux par des produits végétaux menées dans les articles n°1, 4 et 5 ont permis d'approfondir la question de l'importance de la nature des aliments végétaux à utiliser dans un rééquilibrage des apports protéiques. Dans l'article n°1, la substitution des aliments protéiques animaux par un mélange d'aliments protéiques végétaux permettait d'améliorer le score de modération et cela dépendait peu des aliments utilisés en substitution, et était donc essentiellement attribuable à la réduction de la consommation de produits animaux. Cela est assez cohérent étant donné que les produits animaux contribuent plus aux apports en acides gras saturés que les produits végétaux (S. M. Phillips et al., 2015). Cependant, cette conclusion est à nuancer avec les résultats des articles n°4 et 5. En effet, dans l'article n°1, les aliments végétaux utilisés étaient pour la plupart peu transformés (crus ou cuits non assaisonnés) alors que dans les articles n°4 et 5 ce sont des substituts végétaux, qui sont des produits préparés et peuvent avoir des compositions nutritionnelles très diverses. Ainsi, lors de la substitution des produits animaux, le score de modération pouvait augmenter ou diminuer en fonction des substituts utilisés. Les nutriments qui entraînaient une diminution du score de modération lors de la substitution par des substituts végétaux étaient essentiellement le sodium, pour la substitution de la viande, et le sucre hors lactose, pour la substitution du lait ou des desserts lactés.

En effet, la substitution de la viande avec des substituts végétaux diminuait la probabilité d'adéquation pour le sodium, signe d'apports plus excessifs, et cet excès de sodium était associé à des morts supplémentaires d'après le modèle PRIME. Les excès d'apport en sel sont une des principales causes de mortalité prématurée liée à l'alimentation (Afshin et al., 2019) et il apparaît nécessaire de réduire la consommation de sel et la teneur en sel dans les aliments transformés (WHO, 2014). L'OMS recommande d'ailleurs de limiter la quantité de sodium dans les substituts de viande à 250mg pour 100g de substitut (soit environ 0.63g de sel) (WHO, 2021). Sur les 43 substituts de viande (hors légumineuses) de la base de données utilisée dans cette thèse, seuls 3 respectaient cette recommandation (les protéines de soja, le tofu nature et le tempeh). Dans l'article n°7, la teneur en sodium d'un substitut de viande limitait d'ailleurs son introduction dans la modélisation de régimes plus sains du fait d'une contrainte active sur la quantité totale de sodium consommé à ne pas dépasser. Ainsi, les industries agroalimentaires devraient développer des substituts de viande moins salés et les consommateurs devraient être conseillés pour choisir des substituts de viande contenant le moins de sel possible.

De même, la substitution du lait ou des desserts lactés par des substituts végétaux diminuait la probabilité d'adéquation pour le sucre hors lactose, plus particulièrement lorsque les substituts étaient sucrés. Ce résultat était assez attendu car les produits laitiers contiennent du lactose (qui n'est pas inclus dans la recommandation maximale pour le sucre (Anses, 2016a)) et sont remplacés par des produits qui contiennent d'autres sucres, naturellement présents ou ajoutés. Or, la consommation excessive de sucre hors lactose peut favoriser la prise de poids et augmenter le risque de certaines maladies non-transmissibles (Anses, 2016a) et les apports en sucre sont déjà excessifs dans la population française, plus particulièrement chez les enfants (Anses, 2016a, 2019b). Ce travail de substitution a été réalisé uniquement chez les adultes mais il serait intéressant de mener des études similaires chez les enfants pour évaluer les conséquences de telles substitutions sur les apports en sucres hors lactose, mais également sur d'autres nutriments d'intérêt.

Concernant l'adéquation nutritionnelle, les résultats de l'article n°1 montrent que lors d'une substitution des produits animaux par des produits végétaux, un mélange diversifié de protéines végétales est nécessaire pour maintenir un score d'adéquation similaire. Dans l'article n°4, le score d'adéquation pouvait augmenter ou diminuer en fonction des substituts. Dans ces deux articles, le profil d'adéquation en nutriment était systématiquement modifié lorsque l'alimentation contenait plus de protéines végétales avec des apports plus élevés en nutriments actuellement insuffisamment consommés (fibres, acides linoléique et alpha-linolénique, vitamines B9, E, magnésium, …) et des apports plus faibles en nutriments classiquement apportés par les aliments d'origine animale (fer, zinc, calcium, iode, EPA, DHA, vitamines A, B2, B12, …). Bien que les régimes modélisés ne puissent pas être considérés comme végétariens, les résultats sont comparables avec des études ayant étudié les apports en nutriments d'individus végétariens et non-végétariens. Ces études ont constaté des apports plus élevés en acides gras polyinsaturés, fibres, vitamines B9, C, E, magnésium, fer (ingéré) et cuivre et des apports plus faibles en protéines, vitamine B12, calcium, zinc (ingéré), iode et sélénium pour les végétariens comparés aux non-végétariens (Allès et al., 2017; Sobiecki et al., 2016).

Les résultats des articles n°1 et 4 montrent également que l'évolution des probabilités d'adéquation diffère selon les aliments végétaux utilisés. En effet, les aliments végétaux les plus

adaptés nutritionnellement permettent à la fois de limiter la diminution des probabilités d'adéquation pour certains nutriments (sauf pour les EPA, DHA, iode, vitamine B12 et D qui ne sont quasiment pas apportés par les produits végétaux) et de maximiser l'augmentation des probabilités d'adéquation pour les autres nutriments. Ainsi, nous avons montré qu'un mélange contenant des céréales complètes, légumineuses, fruits à coque, graines et légumes ou des substituts à base de soja ou légumes secs étaient les plus adaptés pour une transition végétale. L'article n°6 a également permis de modéliser un substitut végétal optimal pour remplacer la viande afin d'améliorer la qualité de l'alimentation. Même si la composition de ce substitut a été construite à partir de différentes contraintes technologiques, les résultats concordent si on considère que ce substitut est un mélange d'aliments végétaux dont la consommation devrait être favorisée dans le cadre d'une alimentation moins carnée, c'est-à-dire un mélange de légumineuses, légumes, céréales complètes, graines et huiles végétales.

Finalement, d'après les résultats de cette thèse, la végétalisation de l'alimentation entraînerait de moindres apports et un risque de carence plus élevés pour certains nutriments mais aussi un profil plus favorable (plus de fibres, d'acides gras insaturés, moins d'acides gras saturés, de viande rouge et charcuterie) qui pourraient éviter un certain nombre de morts prématurées. Ces impacts dépendent en partie des aliments végétaux utilisés en remplacement des produits animaux. Les résultats de cette thèse ne permettent cependant pas de comparer directement les bénéfices et risques identifiés et d'évaluer si les bénéfices associés à une alimentation plus végétale seraient supérieurs aux risques de carences associés à une diminution de la consommation de produits animaux.

- **Quelle place pour les substituts végétaux dans la transition végétale durable ?**

Les résultats de l'article n°7 montrent que des substituts végétaux de viande avec une bonne composition nutritionnelle pourraient être intégrés dans des régimes alimentaires plus sains et faciliter la réduction de la consommation de viande tout en assurant des apports nutritionnels adéquats. Si les substituts de viande ont de faible teneur en sel, ils pourraient participer à réduire la mortalité prématurée par maladies non-transmissibles. Pour les substituts de lait et desserts lactés, les substituts enrichis en calcium et peu sucrés semblent les plus adaptés pour se substituer aux produits laitiers.

Cependant, la consommation de substituts végétaux entraînerait une augmentation de la consommation de produits ultra-transformés. Comme discuté précédemment, il est difficile d'estimer si les associations entre consommation d'aliments ultra-transformés et risque de maladies non-transmissibles sont plutôt dus à la transformation, à la composition nutritionnelle des produits ultra-transformés ou au profil général de consommation et mode de vie associé à la consommation d'aliments ultra-transformés. La consommation de substituts végétaux au sein d'un profil alimentaire sain ne serait peut-être pas nécessairement défavorable pour la santé, d'autant plus que les substituts végétaux permettent d'augmenter la consommation de fibres, d'acides gras polyinsaturés et d'autres nutriments intéressants. De plus, à l'inverse des aliments peu transformés tel que les légumineuses, les substituts végétaux peuvent être enrichis en certains nutriments (Curtain & Grafenauer, 2019), ce qui pourrait être un levier intéressant pour

pallier certains éventuels risques de carences. L'article n°7 montre d'ailleurs qu'un enrichissement des substituts de viande en fer et zinc était nécessaire pour permettre une réduction plus importante de la viande.

Ces produits présentent également l'avantage d'être facile à cuisiner (Crouzet et al., 2021) et de ne pas nécessiter de changement important des habitudes alimentaires ; ils seraient a priori plus acceptables que les produits à base d'insectes et la viande in vitro (de Koning et al., 2020; Onwezen et al., 2021). Ainsi, ces produits pourraient faciliter dans un premier temps l'adoption de régimes plus végétalisés. Par exemple, un individu ayant l'habitude de consommer du lait et des céréales au petit-déjeuner aura simplement à remplacer le lait par une boisson végétale sans modifier la structure de son petit-déjeuner. Dans le futur, ce consommateur pourrait souhaiter modifier son petit-déjeuner une fois qu'il aura acquis plus de connaissances et de compétences culinaires sur les produits végétaux. De plus, étant donné que le goût est parfois un frein à la consommation de légumineuses (Figueira et al., 2019; Niva et al., 2017), la consommation de substituts végétaux pourrait également permettre de découvrir de nouvelles saveurs et de s'habituer au goût des aliments sources de protéines végétales.

Gehring et al. ont notamment montré que chez les personnes végétariennes, la consommation d'aliments ultra-transformés (dont les substituts végétaux) était associée à une initiation plus récente à un régime végétarien et un âge plus jeune d'adhésion au régime végétarien. Cela peut notamment s'expliquer par une disponibilité plus récente de l'offre de substituts végétaux, et une consommation plus importante d'aliments ultra-transformés chez les individus plus jeunes à la recherche de praticité (Gehring et al., 2021). Les substituts végétaux peuvent être vu comme un bon outil de transition pour les personnes qui voudraient réduire leur consommation de produits animaux et n'aurait pas le temps ni l'envie de cuisiner ou de se renseigner sur la cuisine végétale.

Une des limites de ce travail de thèse est de ne pas avoir considéré davantage de critères de durabilité et notamment sous l'angle des impacts environnementaux et économiques des régimes modélisés. Cependant, d'après les résultats de plusieurs études, les substituts végétaux auraient un moindre impact environnemental que les produits qu'ils visent à remplacer. Smetana et al. ont montré que les substituts à base de soja, d'insectes, de gluten de blé ou de produits laitiers avaient un impact environnemental plus faible que la viande de poulet (Smetana et al., 2015). A l'inverse, les substituts à base de mycoprotéines ou la viande in vitro avaient un impact plus élevé que le poulet. L'impact environnemental était mesuré pour 1kg de produit fini avec un score unique comprenant une quinzaine d'impacts environnementaux (Smetana et al., 2015). Nijdam et al. ont également montré que les légumes secs et les substituts de viande avaient une empreinte carbone et une utilisation des sols plus faibles que la viande (Nijdam, 2012). Fresán et al. ont constaté que les substituts de viande contenant des œufs avaient une empreinte carbone plus importante que ceux composés uniquement de produits végétaux. Il n'y avait cependant pas de différence en fonction de l'ingrédient principal du substitut (soja, blé, soja/blé ou fruits à coque) (Fresán et al., 2019). Ainsi, ces études suggèrent que les régimes modélisés dans cette thèse pourraient avoir un moindre impact environnemental que le régime observé, mais il aurait été intéressant de quantifier l'impact en fonction des différents critères environnementaux. De plus, il serait intéressant de comparer l'impact environnemental de régimes comprenant des substituts végétaux avec des régimes composés essentiellement d'aliments végétaux peu transformés. Concernant l'aspect économique, il serait intéressant d'évaluer le coût des régimes modélisés

d’autant plus que les consommateurs ont tendance à trouver le prix des substituts végétaux trop élevés (Crouzet et al., 2021; ProVeg International, 2020).

Ainsi, des substituts végétaux bien conçus pourraient présenter à la fois des avantages pour la santé et a priori pour l’environnement. Cependant, comme cela a été étudié dans l’article n°7 et également montré par Mertens et al. dans une étude d’optimisation des régimes (Mertens et al., 2020), remplacer la viande par des substituts végétaux n’est pas suffisant pour atteindre des régimes alimentaires plus sains (et durables) et d’autres changements de l’alimentation sont nécessaires. Ainsi, il a été proposé que les pouvoirs publics devraient mieux accompagner les individus dans une transition vers un régime végétalisé en indiquant quelles sont les alternatives (Wickramasinghe et al., 2021). Il y a un ensemble cohérent de données qui pourrait permettre d’appeler à privilégier les aliments peu transformés comme les céréales complètes, légumineuses, fruits à coque et graines mais la consommation de substituts végétaux pourrait également avoir sa place, si elle est faite avec modération et avec des produits de bonne qualité. Ces substituts végétaux, et plus particulièrement les substituts à la viande, peuvent également être préparés et cuisinés à la maison au moyen de recettes simples et accessibles à tous.

2. Conclusion

Le travail présenté dans cette thèse a permis d'évaluer la place des substituts végétaux et aliments sources de protéines issues de la filière oléo-protéagineuse dans une transition des apports protéiques de la population adulte française.

Dans un premier temps, nous avons constaté que la consommation de protéines végétales était associée à la qualité de l'alimentation mais que les apports en protéines végétales étaient peu diversifiés car dominés par les produits à base de céréales raffinées. Le degré de transformation de l'alimentation était différemment associé à la qualité de l'alimentation et à la consommation de protéines. La consommation de produits bruts était associée à une alimentation de meilleure qualité, un moindre risque de mortalité cardiométabolique, à la consommation de protéines animales et une meilleure diversité des apports protéiques végétaux. La consommation de produits transformés était associée à la qualité de l'alimentation mais à un risque plus élevé de mortalité cardiométabolique et à des apports protéiques plus végétaux mais moins diversifié. La consommation d'aliments ultra-transformés était associé à une alimentation de moins bonne qualité, un risque de mortalité cardiométabolique plus élevé et des apports plus faibles en protéines.

Dans un second temps, la modélisation de régimes alimentaires a permis d'identifier les impacts d'une substitution des produits animaux par des produits végétaux. Un mélange diversifié d'aliments sources de protéines végétales (céréales complètes, légumineuses, fruits à coque et graines, …) apparaît nécessaire pour maintenir une bonne adéquation nutritionnelle lors du remplacement de l'ensemble des aliments sources de protéines végétales. Dans le cas de l'utilisation de substituts végétaux pour remplacer la viande le lait ou les desserts lactés, les substituts à base de soja ou les légumes secs semblent être les plus adaptés vis-à-vis de la qualité de l'alimentation. Cependant, il faut veiller à ce que les substituts de viande ne soient pas trop salés et que les boissons et desserts végétaux ne soient pas trop sucrés et contiennent des quantités suffisantes de calcium. Les régimes végétalisés modélisés se caractérisaient par un profil différent d'adéquation en nutriments par rapport aux régimes observés.

Finalement, des méthodes d'optimisation ont permis d'identifier comment la composition nutritionnelle des substituts végétaux pourrait être améliorée pour remplacer au mieux la viande dans le régime alimentaire des adultes français. La combinaison d'objectifs nutritionnels et de contraintes technologiques a permis d'identifier une combinaison optimale d'ingrédients qui permettait de bien plus grandes améliorations des apports en nutriments des régimes. Puis, des régimes alimentaires plus sains ont pu être modélisés en intégrant des substituts végétaux qui, lorsqu'ils étaient enrichis en fer et zinc, permettaient la réduction effective de la consommation de viande sans compromettre le respect des références nutritionnelles.

Pour conclure, une transition protéique à la faveur des protéines végétales pourrait être favorable pour la santé si les aliments végétaux consommés sont diversifiés et comprennent des légumineuses, des céréales complètes, des fruits à coque ou des substituts végétaux peu salés et peu sucrés. En effet, le choix des sources de protéines végétales semble important pour assurer une bonne transition protéique en limitant une élévation du risque de carence pour certains nutriments et en ayant un profil d'apports en nutriments et aliments plus favorable vis-à-

vis de la prévention des maladies non-transmissibles. Les substituts végétaux de bonne qualité nutritionnelle peuvent être un bon outil de transition alimentaire pour favoriser l'adhésion à des régimes plus végétalisés.

3. Perspectives

Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour la poursuite de ce travail de thèse ou pour des travaux complémentaires :

- **La prise en compte des différents critères de durabilité**

Dans cette thèse, seuls des critères de qualité de l'alimentation et de santé ont été pris en compte, par la mesure de l'adéquation et de la sécurité nutritionnelle, l'estimation du nombre de morts prématurées évitées, la transformation de l'alimentation ou des scores de végétalisation de l'alimentation. Or, une alimentation durable est une alimentation qui, en plus d'être saine, a également un faible impact environnemental, est économiquement accessible et culturellement acceptable. Ainsi, il serait intéressant de poursuivre ce travail de thèse en estimant les différents impacts environnementaux des régimes modélisés et les données AGRIBALYSE 3.0 pourraient être utilisées à cet effet (ADEME, 2020). Il serait également intéressant d'évaluer le coût économique des régimes, plus particulièrement dans les régimes intégrant des substituts végétaux. De plus, il serait également intéressant d'évaluer l'exposition aux contaminants alimentaires et aux isoflavones présents dans le soja et certains légumes secs.

- **Poursuivre le travail de développement et validation du SecDiet**

Bien que le score SecDiet ait été validé dans l'article n°3 en évaluant ses associations avec certaines caractéristiques sociodémographiques, des études complémentaires pourraient être menées afin de mieux le caractériser et comprendre ses associations avec les consommations alimentaires. Comme étape supplémentaire de validation, il serait intéressant de coupler le calcul du SecDiet avec des mesures de marqueurs biologiques ou cliniques de carences. Puis, comme perspectives d'applications, on pourrait évaluer ses associations avec la consommation de groupes alimentaires ou la consommation de protéines animales ou végétales. Il pourrait également être pertinent d'évaluer le SecDiet en fonction des différents régimes alimentaires, afin d'évaluer les risques de carence dans les populations végétariennes.

- **Inclure de nouveaux substituts et ingrédients**

Le marché des substituts végétaux étant relativement récent, de nouveaux produits sont régulièrement développés. De nouvelles simulations de substitutions pourraient être menée en incluant de nouveaux aliments et en substituant de nouveaux produits animaux. De même, dans l'optimisation de la recette du substitut de viande, de nouveaux ingrédients pourraient être inclus tels que les algues ou même les insectes. Les compositions nutritionnelles complètes de certaines céréales, farines ou légumineuses n'étaient pas disponible dans la base CIQUAL mais pourraient être incluses dans le futur ou extraites d'autres bases de composition nutritionnelle. Le travail d'optimisation de recette a été réalisé pour un substitut de viande, mais pourrait également être réitéré pour d'autres substituts tels que les boissons végétales ou des substituts de poisson.

- **Etudier les usages et consommations des substituts végétaux**

Afin de mieux comprendre la consommation de substituts végétaux et leur acceptabilité dans la population, il serait intéressant de mener une enquête sur une population représentative de la population française ou sur une population composée uniquement de consommateurs de substituts végétaux. Cela permettrait de mieux identifier les substituts consommés et les raisons,

fréquences et occasions de consommation. On pourrait ainsi étudier l'acceptabilité des substitutions, par exemple si les individus accepteraient de remplacer toute leur consommation de viande par des substituts de viande ou seulement certains morceaux de viande. Cette enquête pourrait également être l'occasion de récolter des données de consommation par l'intermédiaire d'un fréquentiel alimentaire qui permettrait d'étudier la qualité de l'alimentation par le calcul des scores PDI ou du score d'adhésion aux recommandations du PNNS (score PNNS-GS). Ce travail permettrait de mieux comprendre la consommation réelle de substituts végétaux dans une population récente et donc de mieux analyser les impacts associés à leur consommation. Plus globalement, ce travail pourrait permettre d'analyser la qualité de l'alimentation des consommateurs de substituts végétaux et d'identifier dans quelle mesure la consommation de substituts végétaux est associée à une végétalisation de l'alimentation.

- **Identifier des profils de consommation au sein des populations végétariennes**

D'une manière assez similaire, il pourrait être intéressant d'analyser la qualité des différents régimes flexitariens et végétariens. La plupart des études épidémiologiques étudiant les différents régimes alimentaires comparent les individus suivant des régimes végétariens aux individus suivant des régimes non-végétariens, mais ne comparent pas les individus végétariens entre eux. L'utilisation des scores PDI suggèrent que les impacts sur la santé d'un régime plus végétal dépendraient de la nature des aliments végétaux consommés. Ainsi, il serait intéressant d'étudier si, au sein des populations végétariennes, il y a une diversité de régimes alimentaires et s'il y a des profils de consommation plus favorables que d'autre.

RÉFÉRENCES

Cette partie regroupe les références citées dans l'introduction bibliographique, la justification des travaux de thèse et la discussion. Les références citées dans les articles sont insérées à la fin des articles.

ADEME. (2020). *données AGRIBALYSE v3.0*. https://agribalyse.ademe.fr/

Afshin, A., Sur, P. J., Fay, K. A., Cornaby, L., Ferrara, G., Salama, J. S., Mullany, E. C., Abate, K. H., Abbafati, C., Abebe, Z., Afarideh, M., Aggarwal, A., Agrawal, S., Akinyemiju, T., Alahdab, F., Bacha, U., Bachman, V. F., Badali, H., Badawi, A., … Murray, C. J. L. (2019). Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, *393*(10184), 1958-1972. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30041-8

Agreste. (2020). Utilisation du territoire. In *L'agriculture, la forêt, la pêche et les industries agroalimentaires*. agreste. https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/download/publication/publie/GraFra2020Chap1.2/Graf203%20-%20Utilisation%20du%20territoire.pdf

Aleksandrowicz, L., Green, R., Joy, E. J. M., Smith, P., & Haines, A. (2016). The Impacts of Dietary Change on Greenhouse Gas Emissions, Land Use, Water Use, and Health: A Systematic Review. *PLOS ONE*, *11*(11), e0165797. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165797

Allès, B., Baudry, J., Méjean, C., Touvier, M., Péneau, S., Hercberg, S., & Kesse-Guyot, E. (2017). Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Santé Study. *Nutrients*, *9*(9), 1023. https://doi.org/10.3390/nu9091023

Andrieu, E., Darmon, N., & Drewnowski, A. (2006). Low-cost diets: more energy, fewer nutrients. *European Journal of Clinical Nutrition*, *60*(3), 434-436. https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602331

Anses. (2011). *Etude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2)*. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety.

Anses. (2016a). *Actualisation des repères du PNNS : établissement de recommandations d'apport de sucres*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

Anses. (2016b). *Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf

Anses. (2016c). *Actualisation des repères du PNNS : révision des repères de consommations alimentaires*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf

Anses. (2016d). *Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual. Version 2016*. https://ciqual.anses.fr/

Anses. (2016e). *Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles.* Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf

Anses. (2017). *Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA3)*. Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf

Anses. (2019a). *Anses Opinion on the updating of the PNNS dietary guidelines for women from menopause and men over 65 years of age*. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2017SA0143.pdf

Anses. (2019b). *Avis de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du tavail relatif à l'actualisation des repères alimentaires du PNNS pour les enfants de 4 à 17 ans.* Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

Anses. (2020). *Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqual. Version 2020*. https://ciqual.anses.fr/

Anses. (2021). *AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à « Actualisation des références nutritionnelles françaises en vitamines et minéraux » ; saisine n°2018-SA-0238. Saisine liée n°2012-SA-0103.* Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2018SA0238Ra.pdf

Appleby, P., Roddam, A., Allen, N., & Key, T. (2007). Comparative fracture risk in vegetarians and nonvegetarians in EPIC-Oxford. *European Journal of Clinical Nutrition*, *61*(12), 1400-1406. https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602659

Armah, S. M., Carriquiry, A., Sullivan, D., Cook, J. D., & Reddy, M. B. (2013). A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults. *The Journal of Nutrition*, *143*(7), 1136-1140. https://doi.org/10.3945/jn.112.169904

Asioli, D., Aschemann-Witzel, J., Caputo, V., Vecchio, R., Annunziata, A., Næs, T., & Varela, P. (2017). Making sense of the "clean label" trends: A review of consumer food choice behavior and discussion of industry implications. *Food Research International*, *99*, 58-71. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.07.022

Baden, M. Y., Liu, G., Satija, A., Li, Y., Sun, Q., Fung, T. T., Rimm, E. B., Willett, W. C., Hu, F. B., & Bhupathiraju, S. N. (2019). Changes in Plant-Based Diet Quality and Total and Cause-Specific Mortality. *Circulation*, *140*(12), 979-991. https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.119.041014

Baker, P., Machado, P., Santos, T., Sievert, K., Backholer, K., Hadjikakou, M., Russell, C., Huse, O., Bell, C., Scrinis, G., Worsley, A., Friel, S., & Lawrence, M. (2020). Ultra-processed foods and the nutrition transition: Global, regional and national trends, food systems transformations and political economy drivers. *Obesity Reviews*, *21*(12). https://doi.org/10.1111/obr.13126

Barbier, C., Couturier, C., Dumas, P., Kesse-Guyot, E., & Pharabod, I. (2020). *Empreintes sol, énergie et carbone de l'alimentation. Partie 1: empreintes de régimes alimentaires selon les parts de protéines animales et végétales.* (p. 33p). ADEME.

Barbier, C., Couturier, C., Pourouchottamin, P., Cayla, J.-M., Silvestre, M., & Pharabod, I. (2019). L'empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France. *IDDRI*, 24p.

Barré, T., Perignon, M., Gazan, R., Vieux, F., Micard, V., Amiot, M.-J., & Darmon, N. (2018). Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption? *PLOS ONE*, *13*(2), e0191767. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191767

Bath, S. C., Hill, S., Infante, H. G., Elghul, S., Nezianya, C. J., & Rayman, M. P. (2017). Iodine concentration of milk-alternative drinks available in the UK in comparison with cows' milk. *British Journal of Nutrition*, *118*(7), 525-532. https://doi.org/10.1017/S0007114517002136

Becerra-Tomás, N., Papandreou, C., & Salas-Salvadó, J. (2019). Legume Consumption and Cardiometabolic Health. *Advances in Nutrition*, *10*(Supplement_4), S437-S450. https://doi.org/10.1093/advances/nmz003

Benoist, B. de, Andersson, M., Egli, I., Takkouche, B., Allen, H., WHO, & Department of Nutrition for Health and Development. (2004). *Iodine status worldwide WHO global database on iodine deficiency*. World Health Organization, Department of Nutrition for Health and Development.

Bianchi, C. M., Egnell, M., Huneau, J.-F., & Mariotti, F. (2016). Plant Protein Intake and Dietary Diversity Are Independently Associated with Nutrient Adequacy in French Adults. *The Journal of Nutrition*, *146*(11), 2351-2360. https://doi.org/10.3945/jn.116.236869

Biesbroek, S., Bueno-de-Mesquita, H. B., Peeters, P. H., Verschuren, W. M., van der Schouw, Y. T., Kramer, G. F., Tyszler, M., & Temme, E. H. (2014). Reducing our environmental footprint and improving our health: greenhouse gas emission and land use of usual diet and mortality in EPIC-NL: a prospective cohort study. *Environmental Health*, *13*(1), 27. https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-27

Bohrer, B. M. (2017). Review: Nutrient density and nutritional value of meat products and non-meat foods high in protein. *Trends in Food Science & Technology*, *63*, 103-112.

Bohrer, B. M. (2019). An investigation of the formulation and nutritional composition of modern meat analogue products. *Food Science and Human Wellness*, *8*(4), 320-329.

Boukid, F. (2020). Plant-based meat analogues: from niche to mainstream. *European Food Research and Technology*, 1-12. https://doi.org/10.1007/s00217-020-03630-9

Briggs, A. D. M., Cobiac, L. J., Wolstenholme, J., & Scarborough, P. (2019). PRIMEtime CE: a multistate life table model for estimating the cost-effectiveness of interventions affecting diet and physical activity. *BMC Health Services Research*, *19*(1), 485. https://doi.org/10.1186/s12913-019-4237-4

Camilleri, G. M., Verger, E. O., Huneau, J.-F., Carpentier, F., Dubuisson, C., & Mariotti, F. (2013). Plant and Animal Protein Intakes Are Differently Associated with Nutrient Adequacy of the Diet of French Adults. *The Journal of Nutrition*, *143*(9), 1466-1473. https://doi.org/10.3945/jn.113.177113

Cérou, M. (2020, octobre 26). Les eurodéputés n'interdisent pas les « steaks végétaux ». *Process Alimentaire*. https://www.processalimentaire.com/qualite/les-eurodeputes-n-interdisent-pas-les-steaks-vegetaux

Chalupa-Krebzdak, S., Long, C. J., & Bohrer, B. M. (2018). Nutrient density and nutritional value of milk and plant-based milk alternatives. *International Dairy Journal*, *87*, 84-92. https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2018.07.018

Choudhury, D., Singh, S., Seah, J. S. H., Yeo, D. C. L., & Tan, L. P. (2020). Commercialization of Plant-Based Meat Alternatives. *Trends in Plant Science*, *25*(11), 1055-1058. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.08.006

Cifelli, C., Houchins, J., Demmer, E., & Fulgoni, V. (2016). Increasing Plant Based Foods or Dairy Foods Differentially Affects Nutrient Intakes: Dietary Scenarios Using NHANES 2007–2010. *Nutrients*, *8*(7), 422. https://doi.org/10.3390/nu8070422

CLCV. (2020). *Alimentation : que valent les produits végétariens et végan ?* Association nationale de défense des consommateurs et usagers. https://www.clcv.org/alimentation-enquetes/enquete-que-valent-les-produits-vegetariens-et-vegan

Cobiac, L. J., & Scarborough, P. (2019). Modelling the health co-benefits of sustainable diets in the UK, France, Finland, Italy and Sweden. *European Journal of Clinical Nutrition*, *73*(4), 624-633. https://doi.org/10.1038/s41430-019-0401-5

Cocking, C., Walton, J., Kehoe, L., Cashman, K. D., & Flynn, A. (2020). The role of meat in the European diet: current state of knowledge on dietary recommendations, intakes and contribution to energy and nutrient intakes and status. *Nutrition Research Reviews*, *33*(2), 1-9.

Cour de Justice Européenne. (2017). *Renvoi préjudiciel - Organisation commune des marchés des produits agricoles – Règlement (UE) no 1308/2013 – Article 78 et annexe VII, partie III – Décision 2010/791/UE – Définitions, dénominations et dénominations de vente – "Lait" et "produits laitiers" – Dénominations utilisées pour la promotion et la commercialisation d'aliments purement végétaux*. https://curia.europa.eu/juris/document/document.jsf;jsessionid=9ea7d0f130d5adc0c37f4

1b84ab3a30aec3127a5ef69.e34KaxiLc3eQc40LaxqMbN4PaxmSe0?text=&docid=191704&pageIndex=0&doclang=fr&mode=req&dir=&occ=first&part=1&cid=489199
Crouzet, A., Craveur, L., & Tayeau, M. (2021). *Végétariens et flexitariens en France en 2020. Enquête IFOP pour FranceAgriMer*. IFOP.
Curtain, F., & Grafenauer, S. (2019). Plant-Based Meat Substitutes in the Flexitarian Age: An Audit of Products on Supermarket Shelves. *Nutrients*, *11*(11), 2603. https://doi.org/10.3390/nu11112603
Dagevos, H. (2014). Flexibility in the Frequency of Meat Consumption - Empirical Evidence from The Netherlands. *EuroChoices*, *13*(2), 40-45. https://doi.org/10.1111/1746-692X.12062
de Boer, J., Helms, M., & Aiking, H. (2006). Protein consumption and sustainability: Diet diversity in EU-15. *Ecological Economics*, *59*(3), 267-274. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.10.011
de Boer, J., Schösler, H., & Aiking, H. (2014). “Meatless days” or “less but better”? Exploring strategies to adapt Western meat consumption to health and sustainability challenges. *Appetite*, *76*, 120-128. https://doi.org/10.1016/j.appet.2014.02.002
de Boer, J., Schösler, H., & Aiking, H. (2017). Towards a reduced meat diet: Mindset and motivation of young vegetarians, low, medium and high meat-eaters. *Appetite*, *113*, 387-397. https://doi.org/10.1016/j.appet.2017.03.007
de Gavelle, E., Davidenko, O., Fouillet, H., Delarue, J., Darcel, N., Huneau, J.-F., & Mariotti, F. (2019). Self-declared attitudes and beliefs regarding protein sources are a good prediction of the degree of transition to a low-meat diet in France. *Appetite*, *142*, 104345. https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.104345
de Gavelle, E., Huneau, J.-F., Bianchi, C., Verger, E., & Mariotti, F. (2017). Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults. *Nutrients*, *9*(12), 1333. https://doi.org/10.3390/nu9121333
de Gavelle, E., Huneau, J.-F., & Mariotti, F. (2018). Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. *Nutrients*, *10*(2), 226. https://doi.org/10.3390/nu10020226
de Koning, W., Dean, D., Vriesekoop, F., Aguiar, L. K., Anderson, M., Mongondry, P., Oppong-Gyamfi, M., Urbano, B., Luciano, C. A. G., Jiang, B., Hao, W., Eastwick, E., Jiang, Z. (Virgil), & Boereboom, A. (2020). Drivers and Inhibitors in the Acceptance of Meat Alternatives: The Case of Plant and Insect-Based Proteins. *Foods*, *9*(9), 1292. https://doi.org/10.3390/foods9091292
De Marchi, M., Costa, A., Pozza, M., Goi, A., & Manuelian, C. L. (2021). Detailed characterization of plant-based burgers. *Scientific Reports*, *11*(1), 2049. https://doi.org/10.1038/s41598-021-81684-9
de Oliveira Otto, M. C., Padhye, N. S., Bertoni, A. G., Jacobs, D. R., & Mozaffarian, D. (2015). Everything in Moderation - Dietary Diversity and Quality, Central Obesity and Risk of Diabetes. *PLOS ONE*, *10*(10), e0141341. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141341
de Gavelle, E., Huneau, J.-F., Fouillet, H., & Mariotti, F. (2019). The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. *The Journal of Nutrition*, *149*(3), 488-496. https://doi.org/10.1093/jn/nxy275
Dugast, C., & Soyeux, A. (2019). *Faire sa part ? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l’état face à l’urgence climatique* (p. 21). Carbone 4.
Dussiot, A., Fouillet, H., Wang, J., Salomé, M., Huneau, J.-F., Kesse-Guyot, E., & Mariotti, F. (2021). The Health Value of Modelled Healthy Eating Patterns Is Largely Constrained by the Current Reference Values for Bioavailable Iron and Zinc. *Current Developments in Nutrition*, *5*(Supplement_2), 119-119. https://doi.org/10.1093/cdn/nzab035_027
EFSA. (2017). *Dietary Reference Values for nutrients: Summary report* (p. 92). European Food Safety Authority. doi: 10.2903/sp.efsa.2017.e15121

EFSA NDA Panel. (2014). *Scientific Opinion on Dietary Reference Values for zinc*. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2014.3844

Elorinne, A.-L., Alfthan, G., Erlund, I., Kivimäki, H., Paju, A., Salminen, I., Turpeinen, U., Voutilainen, S., & Laakso, J. (2016). Food and Nutrient Intake and Nutritional Status of Finnish Vegans and Non-Vegetarians. *PLOS ONE*, *11*(2), e0148235. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148235

Etude NutriNet-Santé. (2013). *Table de composition des aliments de l'étude NutriNet-Santé (NutriNet-Santé Study Food Composition Database)*. Economica.

Eveleigh, E. R., Coneyworth, L. J., Avery, A., & Welham, S. J. M. (2020). Vegans, Vegetarians, and Omnivores: How Does Dietary Choice Influence Iodine Intake? A Systematic Review. *Nutrients*, *12*(6), 1606. https://doi.org/10.3390/nu12061606

Ezzati, M., Vander Hoorn, S., Rodgers, A., Lopez, A. D., Mathers, C. D., & Murray, C. J. (2003). Estimates of global and regional potential health gains from reducing multiple major risk factors. *The Lancet*, *362*(9380), 271-280. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(03)13968-2

FAO. (2020). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Sustainability in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://doi.org/10.4060/ca9229en

FAO, IFAD, UNICEF, WFP, & WHO. (2020). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. Transforming food systems for affordable healthy diets.* FAO. https://doi.org/10.4060/ca9692en

FAO, & WHO. (2019). *Sustainable healthy diets - Guiding principles*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, World Health Organization.

Farsi, D. N., Uthumange, D., Munoz Munoz, J., & Commane, D. M. (2021). The nutritional impact of replacing dietary meat with meat alternatives in the UK: a modelling analysis using nationally representative data. *British Journal of Nutrition*, 1-31. https://doi.org/10.1017/S0007114521002750

Figueira, N., Curtain, F., Beck, E., & Grafenauer, S. (2019). Consumer Understanding and Culinary Use of Legumes in Australia. *Nutrients*, *11*(7), 1575. https://doi.org/10.3390/nu11071575

Fleury, S., Rivière, G., Allès, B., Kesse-Guyot, E., Méjean, C., Hercberg, S., Touvier, M., & Bemrah, N. (2017). Exposure to contaminants and nutritional intakes in a French vegetarian population. *Food and Chemical Toxicology*, *109*, 218-229. https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.07.048

Foster, M., Chu, A., Petocz, P., & Samman, S. (2013). Effect of vegetarian diets on zinc status: a systematic review and meta-analysis of studies in humans: Zinc and vegetarian diets. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *93*(10), 2362-2371. https://doi.org/10.1002/jsfa.6179

Foster, M., & Samman, S. (2015). Vegetarian Diets Across the Lifecycle. In *Advances in Food and Nutrition Research* (Vol. 74, p. 93-131). Elsevier. https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2014.11.003

FranceAgriMer. (2019). *Combien de végétariens en Europe ? - Synthèse des résultats à partir de l'étude « Panorama de la consommation végétarienne en Europe », réalisée par le CREDOC pour FranceAgriMer et l'OCHA en 2018* [Les études. Edition octobre 2019]. FranceAgriMer.

FranceAgriMer. (2020). *Consommation des produits carnés en 2019.* [Les données. Edition septembre 2020]. FranceAgriMer.

Fresán, U., Mejia, M. A., Craig, W. J., Jaceldo-Siegl, K., & Sabaté, J. (2019). Meat Analogs from Different Protein Sources: A Comparison of Their Sustainability and Nutritional Content. *Sustainability*, *11*(12), 3231. https://doi.org/10.3390/su11123231

Garnett, E. E., Balmford, A., Sandbrook, C., Pilling, M. A., & Marteau, T. M. (2019). Impact of increasing vegetarian availability on meal selection and sales in cafeterias. *Proceedings*

of the National Academy of Sciences, *116*(42), 20923-20929. https://doi.org/10.1073/pnas.1907207116

Gazan, R., Brouzes, C. M. C., Vieux, F., Maillot, M., Lluch, A., & Darmon, N. (2018). Mathematical Optimization to Explore Tomorrow's Sustainable Diets: A Narrative Review. *Advances in Nutrition*, *9*(5), 602-616. https://doi.org/10.1093/advances/nmy049

Gehring, J., Touvier, M., Baudry, J., Julia, C., Buscail, C., Srour, B., Hercberg, S., Péneau, S., Kesse-Guyot, E., & Allès, B. (2021). Consumption of Ultra-Processed Foods by Pesco-Vegetarians, Vegetarians, and Vegans: Associations with Duration and Age at Diet Initiation. *The Journal of Nutrition*, *151*(1), 120-131. https://doi.org/10.1093/jn/nxaa196

GEPV, & Protéines France. (2020). *Nouveau baromètre consommateurs 2020. Alimentation : l'ascension des protéines végétales - 5ème édition* (Communiqué de presse. Septembre 2020).

Ghosh, S., Suri, D., & Uauy, R. (2012). Assessment of protein adequacy in developing countries: quality matters. *British Journal of Nutrition*, *108*(S2), S77-S87. https://doi.org/10.1017/S0007114512002577

Godfray, H. C. J., Aveyard, P., Garnett, T., Hall, J. W., Key, T. J., Lorimer, J., Pierrehumbert, R. T., Scarborough, P., Springmann, M., & Jebb, S. A. (2018). Meat consumption, health, and the environment. *Science*, *361*(6399), eaam5324. https://doi.org/10.1126/science.aam5324

González-García, S., Esteve-Llorens, X., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2018). Carbon footprint and nutritional quality of different human dietary choices. *Science of The Total Environment*, *644*, 77-94. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.339

Haider, L. M., Schwingshackl, L., Hoffmann, G., & Ekmekcioglu, C. (2018). The effect of vegetarian diets on iron status in adults: A systematic review and meta-analysis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *58*(8), 1359-1374. https://doi.org/10.1080/10408398.2016.1259210

Halkjær, J., Olsen, A., Bjerregaard, L. J., Deharveng, G., Tjønneland, A., Welch, A. A., Crowe, F. L., Wirfält, E., Hellstrom, V., Niravong, M., Touvier, M., Linseisen, J., Steffen, A., Ocké, M. C., Peeters, P. H. M., Chirlaque, M. D., Larrañaga, N., Ferrari, P., Contiero, P., … Bingham, S. (2009). Intake of total, animal and plant proteins, and their food sources in 10 countries in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition. *European Journal of Clinical Nutrition*, *63*(S4), S16-S36. https://doi.org/10.1038/ejcn.2009.73

Halkjær, J., Olsen, A., Overvad, K., Jakobsen, M. U., Boeing, H., Buijsse, B., Palli, D., Tognon, G., Du, H., van der A, D. L., Forouhi, N. G., Wareham, N. J., Feskens, E. J. M., Sørensen, T. I. A., & Tjønneland, A. (2011). Intake of total, animal and plant protein and subsequent changes in weight or waist circumference in European men and women: the Diogenes project. *International Journal of Obesity*, *35*(8), 1104-1113. https://doi.org/10.1038/ijo.2010.254

Hall, K. D., Ayuketah, A., Brychta, R., Cai, H., Cassimatis, T., Chen, K. Y., Chung, S. T., Costa, E., Courville, A., Darcey, V., Fletcher, L. A., Forde, C. G., Gharib, A. M., Guo, J., Howard, R., Joseph, P. V., McGehee, S., Ouwerkerk, R., Raisinger, K., … Zhou, M. (2019). Ultra-Processed Diets Cause Excess Calorie Intake and Weight Gain: An Inpatient Randomized Controlled Trial of Ad Libitum Food Intake. *Cell Metabolism*, *30*(1), 67-77.e3. https://doi.org/10.1016/j.cmet.2019.05.008

Hallberg, L., & Hulthén, L. (2000). Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *71*(5), 1147-1160. https://doi.org/10.1093/ajcn/71.5.1147

Harguess, J. M., Crespo, N. C., & Hong, M. Y. (2020). Strategies to reduce meat consumption: A systematic literature review of experimental studies. *Appetite*, *144*, 104478. https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.104478

Heerschop, S. N., Biesbroek, S., Temme, E. H. M., & Ocké, M. C. (2021). Can Healthy and Sustainable Dietary Patterns That Fit within Current Dutch Food Habits Be Identified? *Nutrients*, *13*(4), 1176. https://doi.org/10.3390/nu13041176

Hirvonen, K., Bai, Y., Headey, D., & Masters, W. A. (2020). Affordability of the EAT–Lancet reference diet: a global analysis. *The Lancet Global Health*, *8*(1), e59-e66. https://doi.org/10.1016/S2214-109X(19)30447-4

Hoek, A. C., Elzerman, J. E., Hageman, R., Kok, F. J., Luning, P. A., & Graaf, C. de. (2013). Are meat substitutes liked better over time? A repeated in-home use test with meat substitutes or meat in meals. *Food Quality and Preference*, *28*(1), 253-263. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2012.07.002

Hoek, A. C., Luning, P. A., Weijzen, P., Engels, W., Kok, F. J., & de Graaf, C. (2011). Replacement of meat by meat substitutes. A survey on person- and product-related factors in consumer acceptance. *Appetite*, *56*(3), 662-673. https://doi.org/10.1016/j.appet.2011.02.001

Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(9), 3232-3237. https://doi.org/10.1073/pnas.1109936109

Hu, F. B., Otis, B. O., & McCarthy, G. (2019). Can Plant-Based Meat Alternatives Be Part of a Healthy and Sustainable Diet? *JAMA*, *322*(16), 1547. https://doi.org/10.1001/jama.2019.13187

Hunt, J. R. (2003). Bioavailability of iron, zinc, and other trace minerals from vegetarian diets. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *78*(3), 633S-639S. https://doi.org/10.1093/ajcn/78.3.633S

Iguacel, I., Miguel-Berges, M. L., Gómez-Bruton, A., Moreno, L. A., & Julián, C. (2019). Veganism, vegetarianism, bone mineral density, and fracture risk: a systematic review and meta-analysis. *Nutrition Reviews*, *77*(1), 1-18. https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy045

INCa. (2021). *Panorama des cancers en France - Edition 2021*. Institut national du cancer.

Kane-Diallo, A., Srour, B., Sellem, L., Deschasaux, M., Latino-Martel, P., Hercberg, S., Galan, P., Fassier, P., Guéraud, F., Pierre, F. H., Kesse-Guyot, E., Allès, B., & Touvier, M. (2018). Association between a pro plant-based dietary score and cancer risk in the prospective NutriNet-santé cohort: Pro-animal/vegetable score and cancer risk. *International Journal of Cancer*, *143*(9), 2168-2176. https://doi.org/10.1002/ijc.31593

Kantar WorldPanel. (2017). *Le Flexitarisme : les Français et la consommation de produits d'origine animale - Entre modes et tendances de fond.*

Kathryn Bradbury, Tammy Tong, & Timothy Key. (2017). Dietary Intake of High-Protein Foods and Other Major Foods in Meat-Eaters, Poultry-Eaters, Fish-Eaters, Vegetarians, and Vegans in UK Biobank. *Nutrients*, *9*(12), 1317. https://doi.org/10.3390/nu9121317

Kesse-Guyot, E., Chaltiel, D., Wang, J., Pointereau, P., Langevin, B., Allès, B., Rebouillat, P., Lairon, D., Vidal, R., Mariotti, F., Egnell, M., Touvier, M., Julia, C., Baudry, J., & Hercberg, S. (2020). Sustainability analysis of French dietary guidelines using multiple criteria. *Nature Sustainability*, *3*(5), 377-385. https://doi.org/10.1038/s41893-020-0495-8

Kesse-Guyot, E., Fouillet, H., Baudry, J., Dussiot, A., Langevin, B., Allès, B., Rebouillat, P., Brunin, J., Touvier, M., Hercberg, S., Lairon, D., Mariotti, F., & Pointereau, P. (2021). Halving food-related greenhouse gas emissions can be achieved by redistributing meat consumption: Progressive optimization results of the NutriNet-Santé cohort. *Science of The Total Environment*, *789*, 147901. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147901

Kim, H., Caulfield, L. E., Garcia-Larsen, V., Steffen, L. M., Coresh, J., & Rebholz, C. M. (2019). Plant-Based Diets Are Associated With a Lower Risk of Incident Cardiovascular Disease, Cardiovascular Disease Mortality, and All-Cause Mortality in a General Population of Middle-Aged Adults. *Journal of the American Heart Association*, *8*(16), e012865. https://doi.org/10.1161/JAHA.119.012865

Kim, H., Caulfield, L. E., & Rebholz, C. M. (2018). Healthy Plant-Based Diets Are Associated with Lower Risk of All-Cause Mortality in US Adults. *The Journal of Nutrition*, *148*(4), 624-631. https://doi.org/10.1093/jn/nxy019

Kyriakopoulou, K., Dekkers, B., & van der Goot, A. J. (2019). Plant-Based Meat Analogues. In *Sustainable Meat Production and Processing* (p. 103-126). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814874-7.00006-7

Lane, M. M., Davis, J. A., Beattie, S., Gómez-Donoso, C., Loughman, A., O'Neil, A., Jacka, F., Berk, M., Page, R., Marx, W., & Rocks, T. (2021). Ultraprocessed food and chronic noncommunicable diseases: A systematic review and meta-analysis of 43 observational studies. *Obesity Reviews*, *22*(3). https://doi.org/10.1111/obr.13146

Lassen, A. D., Christensen, L. M., & Trolle, E. (2020). Development of a Danish Adapted Healthy Plant-Based Diet Based on the EAT-Lancet Reference Diet. *Nutrients*, *12*(3), 738. https://doi.org/10.3390/nu12030738

Lea, E. J., Crawford, D., & Worsley, A. (2006). Public views of the benefits and barriers to the consumption of a plant-based diet. *European Journal of Clinical Nutrition*, *60*(7), 828-837. https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602387

Lee, H. J., Yong, H. I., Kim, M., Choi, Y.-S., & Jo, C. (2020). Status of meat alternatives and their potential role in the future meat market — A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *33*(10), 1533-1543. https://doi.org/10.5713/ajas.20.0419

Lee, L., & Simpson, I. (2016). *Are we eating less meat? A british Social Attitudes report.* (p. 33). NatCen Social Research. http://natcen.ac.uk/media/1116002/vegetarian-society-bsa-2014.pdf

Lin, Y., Bolca, S., Vandevijvere, S., De Vriese, S., Mouratidou, T., De Neve, M., Polet, A., Van Oyen, H., Van Camp, J., De Backer, G., De Henauw, S., & Huybrechts, I. (2011). Plant and animal protein intake and its association with overweight and obesity among the Belgian population. *British Journal of Nutrition*, *105*(7), 1106-1116. https://doi.org/10.1017/S0007114510004642

Ma, W., He, X., & Braverman, L. (2016). Iodine Content in Milk Alternatives. *Thyroid*, *26*(9), 1308-1310. https://doi.org/10.1089/thy.2016.0239

Mäkinen, O. E., Wanhalinna, V., Zannini, E., & Arendt, E. K. (2016). Foods for Special Dietary Needs: Non-dairy Plant-based Milk Substitutes and Fermented Dairy-type Products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *56*(3), 339-349. https://doi.org/10.1080/10408398.2012.761950

Malav, O. P., Talukder, S., Gokulakrishnan, P., & Chand, S. (2015). Meat Analog: A Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, *55*(9), 1241-1245. https://doi.org/10.1080/10408398.2012.689381

Malek, L., Umberger, W. J., & Goddard, E. (2019). Committed vs. uncommitted meat eaters: Understanding willingness to change protein consumption. *Appetite*, *138*, 115-126. https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.03.024

Malik, V. S., Li, Y., Tobias, D. K., Pan, A., & Hu, F. B. (2016). Dietary Protein Intake and Risk of Type 2 Diabetes in US Men and Women. *American Journal of Epidemiology*, *183*(8), 715-728. https://doi.org/10.1093/aje/kwv268

Mariotti, F. (2017). Plant Protein, Animal Protein, and Protein Quality. In *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* (p. 621-642). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803968-7.00035-6

Mariotti, F. (2019). Animal and Plant Protein Sources and Cardiometabolic Health. *Advances in Nutrition*, *10*(Supplement_4), S351-S366. https://doi.org/10.1093/advances/nmy110

Mariotti, & Gardner. (2019). Dietary Protein and Amino Acids in Vegetarian Diets—A Review. *Nutrients*, *11*(11), 2661. https://doi.org/10.3390/nu11112661

Martínez Steele, E., Baraldi, L. G., Louzada, M. L. da C., Moubarac, J.-C., Mozaffarian, D., & Monteiro, C. A. (2016). Ultra-processed foods and added sugars in the US diet: evidence from a nationally representative cross-sectional study. *BMJ Open*, *6*(3), e009892. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2015-009892

Martínez Steele, E., Raubenheimer, D., Simpson, S. J., Baraldi, L. G., & Monteiro, C. A. (2018). Ultra-processed foods, protein leverage and energy intake in the USA. *Public Health Nutrition*, *21*(1), 114-124. https://doi.org/10.1017/S1368980017001574

Martínez-González, M. A., Sánchez-Tainta, A., Corella, D., Salas-Salvadó, J., Ros, E., Arós, F., Gómez-Gracia, E., Fiol, M., Lamuela-Raventós, R. M., Schröder, H., Lapetra, J., Serra-Majem, L., Pinto, X., Ruiz-Gutierrez, V., & Ramon Estruch for the PREDIMED Group. (2014). A provegetarian food pattern and reduction in total mortality in the Prevención con Dieta Mediterránea (PREDIMED) study. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *100*(suppl_1), 320S-328S. https://doi.org/10.3945/ajcn.113.071431

Masset, G., Vieux, F., Verger, E. O., Soler, L.-G., Touazi, D., & Darmon, N. (2014). Reducing energy intake and energy density for a sustainable diet: a study based on self-selected diets in French adults. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *99*(6), 1460-1469. https://doi.org/10.3945/ajcn.113.077958

Mathieu, S., & Dorard, G. (2016). Végétarisme, végétalisme, véganisme : aspects motivationnels et psychologiques associés à l'alimentation sélective. *La Presse Médicale*, *45*(9), 726-733. https://doi.org/10.1016/j.lpm.2016.06.031

McEvoy, C. T., Temple, N., & Woodside, J. V. (2012). Vegetarian diets, low-meat diets and health: a review. *Public Health Nutrition*, *15*(12), 2287-2294. https://doi.org/10.1017/S1368980012000936

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A Global Assessment of the Water Footprint of Farm Animal Products. *Ecosystems*, *15*(3), 401-415. https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8

Melina, V., Craig, W., & Levin, S. (2016). Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Vegetarian Diets. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, *116*(12), 1970-1980. https://doi.org/10.1016/j.jand.2016.09.025

Mertens, E., Biesbroek, S., Dofková, M., Mistura, L., D'Addezio, L., Turrini, A., Dubuisson, C., Havard, S., Trolle, E., Geleijnse, J. M., & van 't Veer, P. (2020). Potential Impact of Meat Replacers on Nutrient Quality and Greenhouse Gas Emissions of Diets in Four European Countries. *Sustainability*, *12*(17), 6838. https://doi.org/10.3390/su12176838

Michel, F., Hartmann, C., & Siegrist, M. (2021). Consumers' associations, perceptions and acceptance of meat and plant-based meat alternatives. *Food Quality and Preference*, *87*, 104063. https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104063

Miki, A. J., Livingston, K. A., Karlsen, M. C., Folta, S. C., & McKeown, N. M. (2020). Using Evidence Mapping to Examine Motivations for Following Plant-Based Diets. *Current Developments in Nutrition*, *4*(3), nzaa013. https://doi.org/10.1093/cdn/nzaa013

Miller, L. V., Krebs, N. F., & Hambidge, K. M. (2007). A Mathematical Model of Zinc Absorption in Humans As a Function of Dietary Zinc and Phytate. *The Journal of Nutrition*, *137*(1), 135-141. https://doi.org/10.1093/jn/137.1.135

Monteiro, C., Cannon, G., Lawrence, M., Costa Louzada, M., & Pereira Machado, P. (2019). *Ultra-processed foods, diet quality, and health using the NOVA classification system.* FAO.

Monteiro, C., Cannon, G., Levy, R., Moubarac, J.-C., Jaime, P., Martins, A. P., Canella, D., Louzada, M., & Parra, D. (2016). NOVA. The star shines bright. *World Nutrition*, *7*(1-3), 28-38.

Monteiro, C., Cannon, G., Levy, R., Moubarac, J.-C., Louzada, M. L., Rauber, F., Khandpur, N., Cediel, G., Neri, D., Martinez-Steele, E., Baraldi, L. G., & Jaime, P. C. (2019). Ultra-

processed foods: what they are and how to identify them. *Public Health Nutrition*, *22*(5), 936-941. https://doi.org/10.1017/S1368980018003762
Monteiro, C., Levy, R. B., Claro, R. M., Castro, I. R. R. de, & Cannon, G. (2010). A new classification of foods based on the extent and purpose of their processing. *Cadernos de Saúde Pública*, *26*(11), 2039-2049. https://doi.org/10.1590/S0102-311X2010001100005
Moretti, D. (2017). Plant-Based Diets and Iron Status. In *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* (p. 715-727). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803968-7.00039-3
Mottet, A., de Haan, C., Falcucci, A., Tempio, G., Opio, C., & Gerber, P. (2017). Livestock: On our plates or eating at our table? A new analysis of the feed/food debate. *Global Food Security*, *14*, 1-8. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.001
National Research Council. (1986). *Nutrient Adequacy: Assessment Using Food Consumption Surveys.* National Academies Press. https://doi.org/10.17226/618
Neff, R. A., Edwards, D., Palmer, A., Ramsing, R., Righter, A., & Wolfson, J. (2018). Reducing meat consumption in the USA: a nationally representative survey of attitudes and behaviours. *Public Health Nutrition*, *21*(10), 1835-1844. https://doi.org/10.1017/S1368980017004190
Nijdam, D. (2012). The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy*, *37*(6), 760-770.
Niva, M., Vainio, A., & Jallinoja, P. (2017). Barriers to Increasing Plant Protein Consumption in Western Populations. In *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* (p. 157-171). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803968-7.00010-1
Notarnicola, B., Tassielli, G., Renzulli, P. A., Castellani, V., & Sala, S. (2017). Environmental impacts of food consumption in Europe. *Journal of Cleaner Production*, *140*, 753-765. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.080
Onwezen, M. C., Bouwman, E. P., Reinders, M. J., & Dagevos, H. (2021). A systematic review on consumer acceptance of alternative proteins: Pulses, algae, insects, plant-based meat alternatives, and cultured meat. *Appetite*, *159*, 105058. https://doi.org/10.1016/j.appet.2020.105058
Orlich, M. J., Jaceldo-Siegl, K., Sabaté, J., Fan, J., Singh, P. N., & Fraser, G. E. (2014). Patterns of food consumption among vegetarians and non-vegetarians. *British Journal of Nutrition*, *112*(10), 1644-1653. https://doi.org/10.1017/S000711451400261X
Otten, J. J., Hellwig, J. P., & Meyers, L. D. (Éds.). (2006). *DRI, dietary reference intakes: the essential guide to nutrient requirements*. National Academies Press.
Parker, H. W., & Vadiveloo, M. K. (2019). Diet quality of vegetarian diets compared with nonvegetarian diets: a systematic review. *Nutrition Reviews*, *77*(3), 144-160. https://doi.org/10.1093/nutrit/nuy067
Payne, C. L., Scarborough, P., & Cobiac, L. (2016). Do low-carbon-emission diets lead to higher nutritional quality and positive health outcomes? A systematic review of the literature. *Public Health Nutrition*, *19*(14), 2654-2661. https://doi.org/10.1017/S1368980016000495
Pearce, M., Fanidi, A., Bishop, T. R. P., Sharp, S. J., Imamura, F., Dietrich, S., Akbaraly, T., Bes-Rastrollo, M., Beulens, J. W. J., Byberg, L., Canhada, S., Molina, M. del C. B., Chen, Z., Cortes-Valencia, A., Du, H., Duncan, B. B., Härkänen, T., Hashemian, M., Kim, J., … Forouhi, N. G. (2021). Associations of Total Legume, Pulse, and Soy Consumption with Incident Type 2 Diabetes: Federated Meta-Analysis of 27 Studies from Diverse World Regions. *The Journal of Nutrition*, *151*(5), 1231-1240. https://doi.org/10.1093/jn/nxaa447
Petersen, K. S., Flock, M. R., Richter, C. K., Mukherjea, R., Slavin, J. L., & Kris-Etherton, P. M. (2017). Healthy Dietary Patterns for Preventing Cardiometabolic Disease: The Role of Plant-Based Foods and Animal Products. *Current Developments in Nutrition*, *1*(12), cdn.117.001289. https://doi.org/10.3945/cdn.117.001289

Phillips, D. I. W. (1997). Iodine, milk, and the elimination of endemic goitre in Britain: the story of an accidental public health triumph. *Journal of Epidemiology and Community Health*, *51*, 391-393.

Phillips, S. M., Fulgoni, V. L., Heaney, R. P., Nicklas, T. A., Slavin, J. L., & Weaver, C. M. (2015). Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *101*(6), 1346S-1352S. https://doi.org/10.3945/ajcn.114.084079

Piazza, J., Ruby, M. B., Loughnan, S., Luong, M., Kulik, J., Watkins, H. M., & Seigerman, M. (2015). Rationalizing meat consumption. The 4Ns. *Appetite*, *91*, 114-128. https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.04.011

Popkin, B. M. (2006). Global nutrition dynamics: the world is shifting rapidly toward a diet linked with noncommunicable diseases. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *84*(2), 289-298.

Popkin, B. M., Adair, L. S., & Ng, S. W. (2012). Global nutrition transition and the pandemic of obesity in developing countries. *Nutrition Reviews*, *70*(1), 3-21. https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2011.00456.x

Poti, J. M., Braga, B., & Qin, B. (2017). Ultra-processed Food Intake and Obesity: What Really Matters for Health—Processing or Nutrient Content? *Current Obesity Reports*, *6*(4), 420-431. https://doi.org/10.1007/s13679-017-0285-4

ProVeg International. (2020). *European Consumer Survey on Plant-Based foods - Describing the product landscape and uncovering priorities for product development and improvement.*

Rabès, A., Seconda, L., Langevin, B., Allès, B., Touvier, M., Hercberg, S., Lairon, D., Baudry, J., Pointereau, P., & Kesse-Guyot, E. (2020). Greenhouse gas emissions, energy demand and land use associated with omnivorous, pesco-vegetarian, vegetarian, and vegan diets accounting for farming practices. *Sustainable Production and Consumption*, *22*, 138-146. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.02.010

Radnitz, C., Beezhold, B., & DiMatteo, J. (2015). Investigation of lifestyle choices of individuals following a vegan diet for health and ethical reasons. *Appetite*, *90*, 31-36. https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.02.026

Rauber, F., da Costa Louzada, M. L., Steele, E., Millett, C., Monteiro, C. A., & Levy, R. B. (2018). Ultra-Processed Food Consumption and Chronic Non-Communicable Diseases-Related Dietary Nutrient Profile in the UK (2008–2014). *Nutrients*, *10*(5), 587. https://doi.org/10.3390/nu10050587

Rebouillat, P., Vidal, R., Cravedi, J.-P., Taupier-Letage, B., Debrauwer, L., Gamet-Payrastre, L., Touvier, M., Deschasaux-Tanguy, M., Latino-Martel, P., Hercberg, S., Lairon, D., Baudry, J., & Kesse-Guyot, E. (2021). Prospective association between dietary pesticide exposure profiles and postmenopausal breast-cancer risk in the NutriNet-Santé cohort. *International Journal of Epidemiology*, dyab015. https://doi.org/10.1093/ije/dyab015

Reddy, M. B., & Love, M. (1999). The Impact of Food Processing on the Nutritional Quality of Vitamins and Minerals. In L. S. Jackson, M. G. Knize, & J. N. Morgan (Éds.), *Impact of Processing on Food Safety* (Vol. 459, p. 99-106). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4853-9_7

République Française. (2020). *LOI n° 2020-699 du 10 juin 2020 relative à la transparence de l'information sur les produits agricoles et alimentaires (1)*. Journal officiel de la République Française. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041982762/

Reynolds, C. J., Horgan, G. W., Whybrow, S., & Macdiarmid, J. I. (2019). Healthy and sustainable diets that meet greenhouse gas emission reduction targets and are affordable for different income groups in the UK. *Public Health Nutrition*, *22*(8), 1503-1517.

Ritchie, H., & Roser, M. (2020). Environmental impacts of food production. *Our World in Data*. https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food#licence

Rizzo, G., & Baroni, L. (2018). Soy, Soy Foods and Their Role in Vegetarian Diets. *Nutrients*, *10*(1), 43. https://doi.org/10.3390/nu10010043

Rizzo, G., Laganà, A., Rapisarda, A., La Ferrera, G., Buscema, M., Rossetti, P., Nigro, A., Muscia, V., Valenti, G., Sapia, F., Sarpietro, G., Zigarelli, M., & Vitale, S. (2016). Vitamin B12 among Vegetarians: Status, Assessment and Supplementation. *Nutrients*, *8*(12), 767. https://doi.org/10.3390/nu8120767

Rogissart, L., Foucherot, C., & Bellassen, V. (2019). *Estimer les émissions de gaz à effet de serre de la consommation alimentaire : méthodes et résultats*. I4CE.

Román, S., Sánchez-Siles, L. M., & Siegrist, M. (2017). The importance of food naturalness for consumers: Results of a systematic review. *Trends in Food Science & Technology*, *67*, 44-57. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.010

Rosi, A., Mena, P., Pellegrini, N., Turroni, S., Neviani, E., Ferrocino, I., Di Cagno, R., Ruini, L., Ciati, R., Angelino, D., Maddock, J., Gobbetti, M., Brighenti, F., Del Rio, D., & Scazzina, F. (2017). Environmental impact of omnivorous, ovo-lacto-vegetarian, and vegan diet. *Scientific Reports*, *7*(1), 6105. https://doi.org/10.1038/s41598-017-06466-8

Sabaté, J., & Soret, S. (2014). Sustainability of plant-based diets: back to the future. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *100*(suppl_1), 476S-482S. https://doi.org/10.3945/ajcn.113.071522

Sadler, M. J. (2004). Meat alternatives — market developments and health benefits. *Trends in Food Science & Technology*, *15*(5), 250-260. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2003.09.003

Salas-Salvadó, J., Becerra-Tomás, N., García-Gavilán, J. F., Bulló, M., & Barrubés, L. (2018). Mediterranean Diet and Cardiovascular Disease Prevention: What Do We Know? *Progress in Cardiovascular Diseases*, *61*(1), 62-67. https://doi.org/10.1016/j.pcad.2018.04.006

Sanchez-Sabate, R., & Sabaté, J. (2019). Consumer Attitudes Towards Environmental Concerns of Meat Consumption: A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *16*(7), 1220. https://doi.org/10.3390/ijerph16071220

Santé Publique France. (2019). *Recommandations relatives à l'alimentation, à l'activité physique et à la sédentarité pour les adultes* (p. 63). Santé Publique France.

Satija, A., Bhupathiraju, S. N., Rimm, E. B., Spiegelman, D., Chiuve, S. E., Borgi, L., Willett, W. C., Manson, J. E., Sun, Q., & Hu, F. B. (2016). Plant-Based Dietary Patterns and Incidence of Type 2 Diabetes in US Men and Women: Results from Three Prospective Cohort Studies. *PLOS Medicine*, *13*(6), e1002039. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002039

Satija, A., Bhupathiraju, S. N., Spiegelman, D., Chiuve, S. E., Manson, J. E., Willett, W., Rexrode, K. M., Rimm, E. B., & Hu, F. B. (2017). Healthful and Unhealthful Plant-Based Diets and the Risk of Coronary Heart Disease in U.S. Adults. *Journal of the American College of Cardiology*, *70*(4), 411-422. https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.05.047

Scarborough, P., Allender, S., Clarke, D., Wickramasinghe, K., & Rayner, M. (2012). Modelling the health impact of environmentally sustainable dietary scenarios in the UK. *European Journal of Clinical Nutrition*, *66*(6), 710-715. https://doi.org/10.1038/ejcn.2012.34

Scarborough, P., Appleby, P. N., Mizdrak, A., Briggs, A. D. M., Travis, R. C., Bradbury, K. E., & Key, T. J. (2014). Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Climatic Change*, *125*(2), 179-192. https://doi.org/10.1007/s10584-014-1169-1

Scarborough, P., Harrington, R. A., Mizdrak, A., Zhou, L. M., & Doherty, A. (2014). The Preventable Risk Integrated ModEl and Its Use to Estimate the Health Impact of Public Health Policy Scenarios. *Scientifica*, *2014*, 1-21. https://doi.org/10.1155/2014/748750

Schösler, H., Boer, J. de, & Boersema, J. J. (2012). Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution. *Appetite*, *58*(1), 39-47. https://doi.org/10.1016/j.appet.2011.09.009

Schösler, H., de Boer, J., Boersema, J. J., & Aiking, H. (2015). Meat and masculinity among young Chinese, Turkish and Dutch adults in the Netherlands. *Appetite*, *89*, 152-159. https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.02.013

Schüpbach, R., Wegmüller, R., Berguerand, C., Bui, M., & Herter-Aeberli, I. (2015). Micronutrient status and intake in omnivores, vegetarians and vegans in Switzerland. *Eur J Nutr*, 11.

Seconda, L., Baudry, J., Allès, B., Soler, L.-G., Hercberg, S., Langevin, B., Pointereau, P., Lairon, D., & Kesse-Guyot, E. (2018). Identification of sustainable dietary patterns by a multicriteria approach in the NutriNet-Santé cohort. *Journal of Cleaner Production*, *196*, 1256-1265. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.143

Seconda, L., Baudry, J., Allès, B., Touvier, M., Hercberg, S., Pointereau, P., Lairon, D., & Kesse-Guyot, E. (2020). Prospective associations between sustainable dietary pattern assessed with the Sustainable Diet Index (SDI) and risk of cancer and cardiovascular diseases in the French NutriNet-Santé cohort. *European Journal of Epidemiology*, *35*(5), 471-481. https://doi.org/10.1007/s10654-020-00619-2

Seconda, L., Baudry, J., Pointereau, P., Lacour, C., Langevin, B., Hercberg, S., Lairon, D., Allès, B., & Kesse-Guyot, E. (2019). Development and validation of an individual sustainable diet index in the NutriNet-Santé study cohort. *British Journal of Nutrition*, *121*(10), 1166-1177. https://doi.org/10.1017/S0007114519000369

Seconda, L., Fouillet, H., Huneau, J.-F., Pointereau, P., Baudry, J., Langevin, B., Lairon, D., Allès, B., Touvier, M., Hercberg, S., Mariotti, F., & Kesse-Guyot, E. (2021). Conservative to disruptive diets for optimizing nutrition, environmental impacts and cost in French adults from the NutriNet-Santé cohort. *Nature Food*, *2*(3), 174-182. https://doi.org/10.1038/s43016-021-00227-7

Seconda, L., Salmon Legagneur, A., & Hébel, P. (2021). *Renversement de tendance : les Français végétalisent leur alimentation* (N° 315). CREDOC.

Segovia-Siapco, G., & Sabaté, J. (2019). Health and sustainability outcomes of vegetarian dietary patterns: a revisit of the EPIC-Oxford and the Adventist Health Study-2 cohorts. *European Journal of Clinical Nutrition*, *72*(S1), 60-70. https://doi.org/10.1038/s41430-018-0310-z

Sethi, S., Tyagi, S. K., & Anurag, R. K. (2016). Plant-based milk alternatives an emerging segment of functional beverages: a review. *Journal of Food Science and Technology*, *53*(9), 3408-3423. https://doi.org/10.1007/s13197-016-2328-3

Seves, S. M., Verkaik-Kloosterman, J., Biesbroek, S., & Temme, E. H. (2017). Are more environmentally sustainable diets with less meat and dairy nutritionally adequate? *Public Health Nutrition*, *20*(11), 2050-2062. https://doi.org/10.1017/S1368980017000763

Sköld, B., Baltruszewicz, M., Aall, C., Andersson, C., Herrmann, A., Amelung, D., Barbier, C., Nilsson, M., Bruyère, S., & Sauerborn, R. (2018). Household Preferences to Reduce Their Greenhouse Gas Footprint: A Comparative Study from Four European Cities. *Sustainability*, *10*(11), 4044. https://doi.org/10.3390/su10114044

Smetana, S., Mathys, A., Knoch, A., & Heinz, V. (2015). Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *20*(9), 1254-1267. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0931-6

Sobiecki, J. G., Appleby, P. N., Bradbury, K. E., & Key, T. J. (2016). High compliance with dietary recommendations in a cohort of meat eaters, fish eaters, vegetarians, and vegans: results from the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition–Oxford study. *Nutrition Research*, *36*(5), 464-477. https://doi.org/10.1016/j.nutres.2015.12.016

Song, M., Fung, T. T., Hu, F. B., Willett, W. C., Longo, V. D., Chan, A. T., & Giovannucci, E. L. (2016). Association of Animal and Plant Protein Intake With All-Cause and Cause-Specific Mortality. *JAMA Internal Medicine*, *176*(10), 1453. https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2016.4182

Springmann, M., Clark, M., Mason-D'Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B. L., Lassaletta, L., de Vries, W., Vermeulen, S. J., Herrero, M., Carlson, K. M., Jonell, M., Troell, M., DeClerck, F., Gordon, L. J., Zurayk, R., Scarborough, P., Rayner, M., Loken, B., Fanzo, J., … Willett, W. (2018). Options for keeping the food system within environmental limits. *Nature*, *562*(7728), 519-525. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0594-0

Srour, B., & Touvier, M. (2021). Ultra-processed foods and human health: What do we already know and what will further research tell us? *EClinicalMedicine*, *32*, 100747. https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2021.100747

Steib, C. A., Johansson, I., Hefni, M. E., & Witthöft, C. M. (2020). Diet and nutrient status of legume consumers in Sweden: a descriptive cross-sectional study. *Nutrition Journal*, *19*(1), 27. https://doi.org/10.1186/s12937-020-00544-w

Szejda, K., Urbanovich, T., & Wilks, M. (2020). *Accelerating consumer adoption of plant-based meat: An evidence-based guide for effective practice. Five Working Papers.* (p. 111). The Good Food Institute. go.gfi.org/plant-based-meat-consumer-adoption

Tang, J., Wan, Y., Zhao, M., Zhong, H., Zheng, J.-S., & Feng, F. (2020). Legume and soy intake and risk of type 2 diabetes: a systematic review and meta-analysis of prospective cohort studies. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *111*(3), 677-688. https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz338

Tavoularis, G., & Sauvage, E. (2018). *Consommation et modes de vie. Les nouvelles générations transforment la consommation de viande*. CREDOC. https://www.credoc.fr/publications/les-nouvelles-generations-transforment-la-consommation-de-viande

Temme, E. H., van der Voet, H., Thissen, J. T., Verkaik-Kloosterman, J., van Donkersgoed, G., & Nonhebel, S. (2013). Replacement of meat and dairy by plant-derived foods: estimated effects on land use, iron and SFA intakes in young Dutch adult females. *Public Health Nutrition*, *16*(10), 1900-1907. https://doi.org/10.1017/S1368980013000232

Tharrey, M., Mariotti, F., Mashchak, A., Barbillon, P., Delattre, M., & Fraser, G. E. (2018). Patterns of plant and animal protein intake are strongly associated with cardiovascular mortality: the Adventist Health Study-2 cohort. *International Journal of Epidemiology*, *47*(5), 1603-1612. https://doi.org/10.1093/ije/dyy030

Tian, S., Xu, Q., Jiang, R., Han, T., Sun, C., & Na, L. (2017). Dietary Protein Consumption and the Risk of Type 2 Diabetes: A Systematic Review and Meta-Analysis of Cohort Studies. *Nutrients*, *9*(9), 982. https://doi.org/10.3390/nu9090982

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, *418*(6898), 671-677. https://doi.org/10.1038/nature01014

Tong, T. Y. N., Appleby, P. N., Bradbury, K. E., Perez-Cornago, A., Travis, R. C., Clarke, R., & Key, T. J. (2019). Risks of ischaemic heart disease and stroke in meat eaters, fish eaters, and vegetarians over 18 years of follow-up: results from the prospective EPIC-Oxford study. *BMJ*, *366*, 10. https://doi.org/10.1136/bmj.l4897

Tucci, M., Martini, D., Del Bo', C., Marino, M., Battezzati, A., Bertoli, S., Porrini, M., & Riso, P. (2021). An Italian-Mediterranean Dietary Pattern Developed Based on the EAT-Lancet Reference Diet (EAT-IT): A Nutritional Evaluation. *Foods*, *10*(3), 558. https://doi.org/10.3390/foods10030558

Van Kernebeek, H. R. J., Oosting, S. J., Van Ittersum, M. K., Bikker, P., & De Boer, I. J. M. (2016). Saving land to feed a growing population: consequences for consumption of crop

and livestock products. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(5), 677-687. https://doi.org/10.1007/s11367-015-0923-6

Van Mierlo, K., Rohmer, S., & Gerdessen, J. C. (2017). A model for composing meat replacers: Reducing the environmental impact of our food consumption pattern while retaining its nutritional value. *Journal of Cleaner Production*, *165*, 930-950. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.098

van Zanten, H. H. E., Meerburg, B. G., Bikker, P., Herrero, M., & de Boer, I. J. M. (2016). Opinion paper: The role of livestock in a sustainable diet: a land-use perspective. *Animal*, *10*(4), 547-549. https://doi.org/10.1017/S1751731115002694

Vanga, S. K., & Raghavan, V. (2018). How well do plant based alternatives fare nutritionally compared to cow's milk? *Journal of Food Science and Technology*, *55*(1), 10-20. https://doi.org/10.1007/s13197-017-2915-y

Vatanparast, H., Islam, N., Shafiee, M., & Ramdath, D. D. (2020). Increasing Plant-Based Meat Alternatives and Decreasing Red and Processed Meat in the Diet Differentially Affect the Diet Quality and Nutrient Intakes of Canadians. *Nutrients*, *12*(7), 2034. https://doi.org/10.3390/nu12072034

Verger, E. O., Le Port, A., Borderon, A., Bourbon, G., Moursi, M., Savy, M., Mariotti, F., & Martin-Prevel, Y. (2021). Dietary Diversity Indicators and Their Associations with Dietary Adequacy and Health Outcomes: A Systematic Scoping Review. *Advances in Nutrition*, nmab009. https://doi.org/10.1093/advances/nmab009

Verger, E. O., Mariotti, F., Holmes, B. A., Paineau, D., & Huneau, J.-F. (2012). Evaluation of a Diet Quality Index Based on the Probability of Adequate Nutrient Intake (PANDiet) Using National French and US Dietary Surveys. *PLoS ONE*, *7*(8), e42155. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042155

Vieux, F., Perignon, M., Gazan, R., & Darmon, N. (2018). Dietary changes needed to improve diet sustainability: are they similar across Europe? *European Journal of Clinical Nutrition*, *72*(7), 951-960. https://doi.org/10.1038/s41430-017-0080-z

Vieux, F., Soler, L.-G., Touazi, D., & Darmon, N. (2013). High nutritional quality is not associated with low greenhouse gas emissions in self-selected diets of French adults. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *97*(3), 569-583. https://doi.org/10.3945/ajcn.112.035105

Viguiliouk, E., Glenn, A. J., Nishi, S. K., Chiavaroli, L., Seider, M., Khan, T., Bonaccio, M., Iacoviello, L., Mejia, S. B., Jenkins, D. J. A., Kendall, C. W. C., Kahleová, H., Rahelić, D., Salas-Salvadó, J., & Sievenpiper, J. L. (2019). Associations between Dietary Pulses Alone or with Other Legumes and Cardiometabolic Disease Outcomes: An Umbrella Review and Updated Systematic Review and Meta-analysis of Prospective Cohort Studies. *Advances in Nutrition*, *10*(Supplement_4), S308-S319. https://doi.org/10.1093/advances/nmz113

WCRF/AICR. (2018). *Diet, Nutrition, Physical Activity and Cancer: a Global Perspective. Continuous Update Project Expert Report 2018.* World Cancer Research Fund/American Institute for Cancer Research. https://www.wcrf.org/diet-and-cancer/

Weinrich, R. (2019). Opportunities for the Adoption of Health-Based Sustainable Dietary Patterns: A Review on Consumer Research of Meat Substitutes. *Sustainability*, *11*(15), 4028. https://doi.org/10.3390/su11154028

WHO. (2014). *Global status report on noncommunicable diseases 2014*. World Health Organization.

WHO. (2021). *WHO global sodium benchmarks for different food categories.* World Health Organization.

WHO, & FAO. (2004). *Vitamin and mineral requirements in human nutrition : report of a joint FAO/WHO expert consultation*. World Health Organization and Food and Agriculture Organization of the United Nations.

WHO/FAO/UNU. (2007). *Protein and amino acid requirements in human nutrition: report of a joint WHO/FAO/UNU Expert Consultation* (WHO Technical Report Series). World Health Organization.

Wickramasinghe, K., Breda, J., Berdzuli, N., Rippin, H., Farrand, C., & Halloran, A. (2021). The shift to plant-based diets: are we missing the point? *Global Food Security*, *29*, 100530. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100530

Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., Tilman, D., DeClerck, F., Wood, A., Jonell, M., Clark, M., Gordon, L. J., Fanzo, J., Hawkes, C., Zurayk, R., Rivera, J. A., De Vries, W., Majele Sibanda, L., … Murray, C. J. L. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *The Lancet*, *393*(10170), 447-492. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4

Wilson, N., Cleghorn, C. L., Cobiac, L. J., Mizdrak, A., & Nghiem, N. (2019). Achieving Healthy and Sustainable Diets: A Review of the Results of Recent Mathematical Optimization Studies. *Advances in Nutrition*, *10*(Supplement_4), S389-S403. https://doi.org/10.1093/advances/nmz037

Wu, G., Fanzo, J., Miller, D. D., Pingali, P., Post, M., Steiner, J. L., & Thalacker-Mercer, A. E. (2014). Production and supply of high-quality food protein for human consumption: sustainability, challenges, and innovations: Sustainability, challenge and innovations. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1321*(1), 1-19. https://doi.org/10.1111/nyas.12500

Zhong, V. W., Van Horn, L., Greenland, P., Carnethon, M. R., Ning, H., Wilkins, J. T., Lloyd-Jones, D. M., & Allen, N. B. (2020). Associations of Processed Meat, Unprocessed Red Meat, Poultry, or Fish Intake With Incident Cardiovascular Disease and All-Cause Mortality. *JAMA Internal Medicine*, *180*(4), 503. https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2019.6969

ÉCOLE DOCTORALE
Agriculture, alimentation, biologie, environnement, santé (ABIES)

Titre : Place des substituts végétaux issus de la filière oléo-protéagineuse dans la transition protéique de la population française : analyses, simulations et optimisations nutritionnelles.

Mots clés : Protéines végétales ; Adéquation nutritionnelle ; Modélisation de régimes alimentaires ; Substituts végétaux

Résumé : Afin de rendre les régimes alimentaires occidentaux plus durables, un changement d'alimentation s'impose. Notamment, la réduction de la consommation de produits animaux permettrait de réduire les impacts environnementaux de l'alimentation et d'améliorer la santé des populations, à condition de favoriser des aliments végétaux favorables pour la santé. Dans ce contexte, on observe un développement rapide de produits de substitution à la viande et aux produits laitiers, qui pourraient faciliter la consommation de protéines végétales. Cependant, l'impact de leur consommation sur la qualité de l'alimentation et la santé a été peu caractérisé. L'objectif de cette thèse était d'étudier la place des aliments sources de protéines végétales, et plus particulièrement des substituts végétaux aux produits animaux, dans le cadre d'une transition alimentaire favorisant les protéines végétales.

Par des études d'observation, nous avons constaté que les sources de protéines végétales étaient actuellement peu diversifiées car principalement apportées par les produits céréaliers. Puis par des modèles de simulation de changement de régimes alimentaires, nous avons montré que les modifications de consommation de produits animaux étaient associées aux profils d'adéquation nutritionnelle de telle sorte qu'un mélange diversifié d'aliments protéiques végétaux était à privilégier en substitution. De même, les substituts végétaux sont très hétérogènes, et ceux à base de légumineuses sont apparus comme les plus appropriés pour remplacer les produits animaux. Enfin, par des modèles d'optimisation, nous avons montré qu'il était possible de composer des produits végétaux de très forte valeur nutritionnelle pour se substituer à la viande et que lors de la modélisation de régimes alimentaires plus sains, l'introduction de substituts végétaux pouvait favoriser la réduction de la consommation de viande, d'autant plus s'ils sont enrichis en fer et zinc.

Title: Role of plant-based substitutes from oil- and protein-rich plants in the protein transition of the French population: nutritional analyses, simulations and optimizations.

Keywords: Plant protein ; Nutrient adequacy ; Diet modeling; Plant-based substitutes

Abstract: A dietary shift is needed to make Western diets more sustainable. In particular, reducing the consumption of animal products would reduce the environmental impacts of food consumption and improve population health, provided that the consumption of healthy plant-based foods is preferred. In this context, there is a growing interest for alternative products to meat and dairy products (i.e. plant-based meat and dairy substitutes), which could facilitate the adoption of a more plant-based diet. However, the impact of the consumption of plant-based substitutes on diet quality and health has been poorly characterized. The objective of this thesis was to study the role of plant protein foods, and more specifically plant-based substitutes, in the context of a dietary transition in favor of plant proteins.

Using observational studies, we found that plant protein sources were currently poorly diversified, being mainly provided by grain products. Then, using simulation models of dietary changes, we showed that reductions in animal product consumption were associated with nutrient adequacy profiles, so that a diversified mix of plant protein foods should be preferred as a replacement. Furthermore, the quality of plant-based substitutes is very heterogeneous, and plant-based substitutes made with legumes appeared to be the most appropriate to replace animal products. Finally, using optimization models, we have shown that plant-based products with a very high nutritional value can be designed to replace meat and that when modeling healthier diets, the introduction of plant-based substitutes could favor the reduction of meat consumption, especially if they are fortified with iron and zinc.

Maison du doctorat de l'Université Paris-Saclay
2ème étage aile ouest, Ecole normale supérieure Paris-Saclay
4 avenue des Sciences,
91190 Gif sur Yvette, France