



HAL
open science

Quelle prospective et quelles modalités nutritionnelles dans le cadre d'une transition proflexitarienne de l'alimentation en France ? Analyse des leviers et freins nutritionnels et diététiques à la diminution de la consommation de viande

Alison Dussiot

► To cite this version:

Alison Dussiot. Quelle prospective et quelles modalités nutritionnelles dans le cadre d'une transition proflexitarienne de l'alimentation en France ? Analyse des leviers et freins nutritionnels et diététiques à la diminution de la consommation de viande. Alimentation et Nutrition. Université Paris-Saclay, 2022. Français. NNT : 2022UPASB050 . tel-04222144

HAL Id: tel-04222144

<https://pastel.hal.science/tel-04222144>

Submitted on 29 Sep 2023

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.

Quelle prospective et quelles modalités
nutritionnelles dans le cadre d'une transition
proflexitarienne de l'alimentation en France ?
Analyse des leviers et freins nutritionnels et
diététiques à la diminution de la consommation
de viande.

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
Graduate School : Biosphera. Référent : AgroParisTech

Thèse préparée dans l'**UMR PNCA** (Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech),
sous la direction de **François MARIOTTI**, Professeur, la co-direction de **Emmanuelle
KESSE-GUYOT**, Directrice de Recherche, et le co-encadrement de **Hélène FOUILLET**,
Chargée de Recherche

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 27 septembre 2022, par

Alison DUSSIOT

Composition du Jury

Philippe LESCOAT Professeur, AgroParisTech (Université Paris-Saclay)	Président
Cécilia SAMIERI Directrice de Recherche, INSERM (Université Bordeaux)	Rapporteur & Examinatrice
Stéphane WALRAND Professeur, Université de Clermont Auvergne	Rapporteur & Examineur
Erwan de GAVELLE IPEF, DGAL Ministère de l'Agriculture	Examineur
François MARIOTTI Professeur, AgroParisTech (Université Paris-Saclay)	Directeur de thèse
Emmanuelle KESSE-GUYOT Directrice de Recherche, INRAE (Université Paris-Saclay)	Co-directrice de thèse
Hélène FOUILLET Chargée de Recherche, INRAE (Université Paris-Saclay)	Invitée

Titre : Quelle prospective et quelles modalités nutritionnelles dans le cadre d'une transition proflexitarienne de l'alimentation en France ? Analyse des leviers et freins nutritionnels et diététiques à la diminution de la consommation de viande.

Mots clés : optimisation du régime alimentaire ; régimes alimentaires sains ; réduction progressive de la viande ; biodisponibilité du fer et du zinc ; pressions environnementales

Résumé : Alors que la place de la viande et des produits carnés dans une alimentation durable est devenue un sujet de société, c'est un sujet scientifique qui n'a pas été suffisamment exploré rationnellement par une approche d'analyse systémique, et les éléments probants restent fragmentaires. De nombreuses études ont porté sur quelques nutriments importants qui sont apportés par la viande (par exemple, les protéines, le fer, ou encore la vitamine B12), et dont l'insuffisance d'apport peut avoir des conséquences sévères, sans analyser de manière hiérarchique dans quelle mesure ces nutriments sont effectivement critiques, et quels remodelages du régime alimentaire pourraient offrir des solutions à la réduction de la viande tout en conduisant à des régimes plus durables.

Nos résultats fournissent des éléments solides quant aux

nutriments les plus limitants (fer et zinc biodisponibles, vitamine A) lors de la diminution de la viande. Les régimes alimentaires modélisés comportaient davantage de fruits, de légumes et de céréales complètes et étaient plus favorables à la santé que les régimes occidentaux de référence. Ces changements alimentaires ont également entraîné une diminution des pressions sur l'environnement liées à l'alimentation. Certains nutriments n'étaient jamais en cause lorsqu'on simule une transition vers des régimes sans viande (comme les protéines et les acides aminés indispensables, et la vitamine B12). En identifiant les nutriments limitants et les solutions diététiques lors de la réduction de la viande, notre travail fournit une analyse claire et détaillée de l'importance de la viande dans les régimes alimentaires durables.

Title : What prospective and nutritional modalities in the framework of a proflexitarian transition of the diet of French adults ? Analysis of the nutritional and dietary levers and brakes on the reduction of meat consumption.

Keywords : diet optimization ; healthy dietary patterns ; gradual meat reduction ; iron and zinc bioavailability ; environmental pressures

Abstract : While the importance of meat has become a societal topic, it is a scientific subject that has not been sufficiently explored rationally by a systemic analysis approach, and the evidence remains fragmented. Many studies reported on a few important nutrients that are conveyed by meat (e.g. protein, iron, or vitamin B12), and whose inadequate intake can have severe consequences, without analyzing in a hierarchical way to what extent nutrients brought by meat are indeed critical and which remodeling of the diet could offer solutions to the reduction of meat while leading to more sustainable diets.

Our results provide strong evidence as to which nutrients

are the most limiting (bioavailable iron and zinc, vitamin A) when decreasing meat. Modeled dietary patterns included more fruits, vegetables and whole grain products, and were healthier than typical Western diets. These dietary changes led to a reduction in diet-related environmental pressures. Some nutrients were never at issue when simulating a transition toward meat-free diets (such as protein and essential amino acids and vitamin B12). By identifying limiting nutrients and dietary solutions when reducing meat, our work provides a clear and detailed analysis of the importance of meat in sustainable diets.

Remerciements

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de cette thèse.

Je tiens tout d'abord à remercier Cécilia Samieri et Stéphane Walrand pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Mes remerciements vont aussi à Philippe Lescoat et Erwan de Gavelle, les examinateurs.

Je remercie mon co-directeur de thèse, François Mariotti, qui m'a donné ma chance et permis d'effectuer ma thèse au sein du laboratoire PNCA. J'y ai appris énormément, et ça aura été une grande expérience que je n'oublierai pas. Merci pour son précieux encadrement et sa réactivité, qui m'ont permis de mener à bien cette thèse dans les meilleures conditions. Je remercie également ma co-directrice de thèse, Emmanuelle Kesse-Guyot, qui a été très disponible pour m'orienter, et qui a su par ses questions et ses conseils bienveillants me permettre de toujours pousser un peu plus loin mon raisonnement. Je remercie Hélène Fouillet, pour avoir co-encadré mes travaux de thèse. Ses conseils et remarques très constructifs m'ont permis d'améliorer grandement la qualité de mes travaux.

Je remercie Claire Gaudichon de m'avoir accueillie au sein du laboratoire, ainsi que l'ensemble des membres pour les moments partagés durant ces trois années. En particulier, je remercie Jean-François Huneau et Juhui Wang qui m'ont fourni une aide précieuse pour avancer dans cette recherche. Merci aussi à Pauline Turk pour sa contribution.

Je souhaite remercier également les différentes personnes que j'ai pu croiser dans les différentes organisations professionnelles et bureaux de la DGAL, ainsi que les membres de mon comité de thèse pour leur savoir et leur collaboration, m'aidant ainsi à alimenter cette étude : Jean-Luc Angot, Karine Boquet, Carole Foulon, Julia Gassie, François-Gilles Le Theule, Irène Margaritis, Sylvie Mialet, Viviane Moquay, Philippe Schmidely, Sylvie Vareille, Caroline Viste-Martin.

Mes pensées vont aussi à tous les doctorants et jeunes docteurs: Alya, Armelle, Chloé, Elie, Erwan, Florence, Gabrielle, Gaëtan, Joanna, Joséphine, Laurianne, Moufidath, Nathalie,

Pauline, Sandra, Soukaïna, Trenton. Les rapports humains à leur côté ont fait naître de réels liens d'amitiés, nos fous rires et les bons moments passés ensemble vont me manquer !

Je voudrais également remercier toutes les personnes extérieures du domaine universitaire qui m'ont, à leur façon, apporté leur aide. Au terme de ce parcours, je souhaite exprimer ma sincère gratitude à tous les membres de ma famille. Je remercie enfin tous mes amis de grande date qui ont su m'apporter confiance et écoute à tous les moments. Ainsi, je remercie particulièrement Claire, Marie, Mathilde, Morgane, et Perrine. Bien entendu, cette liste n'est pas exhaustive et je remercie tous ceux et celles qui me connaissent et qui me permettent de me sentir exister. Merci à toutes et à tous.

« Que ton aliment soit ta seule médecine. »

Hippocrate

Résumé

Alors que la place de la viande et des produits carnés dans une alimentation durable est devenue un sujet de société, c'est un sujet scientifique qui n'a pas été suffisamment exploré rationnellement par une approche d'analyse systémique, et les éléments probants restent fragmentaires. De nombreuses études ont porté sur quelques nutriments importants qui sont apportés par la viande (par exemple, les protéines, le fer, ou encore la vitamine B12), et dont l'insuffisance d'apport peut avoir des conséquences sévères, sans analyser de manière hiérarchique dans quelle mesure ces nutriments sont effectivement critiques, et quels remodelages du régime alimentaire pourraient offrir des solutions à la réduction de la viande tout en conduisant à des régimes plus durables.

Nos résultats fournissent des éléments solides quant aux nutriments les plus limitants (fer et zinc biodisponibles, vitamine A) lors de la diminution de la viande. Les régimes alimentaires modélisés comportaient davantage de fruits, de légumes et de céréales complètes et étaient plus favorables à la santé que les régimes occidentaux de référence. Ces changements alimentaires ont également entraîné une diminution des pressions sur l'environnement liées à l'alimentation. Certains nutriments n'étaient jamais en cause lorsqu'on simule une transition vers des régimes sans viande (comme les protéines et les acides aminés indispensables, et la vitamine B12). En identifiant les nutriments limitants et les solutions diététiques lors de la réduction de la viande, notre travail fournit une analyse claire et détaillée de l'importance de la viande dans les régimes alimentaires durables.

Abstract

While the importance of meat has become a societal topic, it is a scientific subject that has not been sufficiently explored rationally by a systemic analysis approach, and the evidence remains fragmented. Many studies reported on a few important nutrients that are conveyed by meat (e.g. protein, iron, or vitamin B12), and whose inadequate intake can have severe consequences, without analyzing in a hierarchical way to what extent nutrients brought by meat are indeed critical and which remodeling of the diet could offer solutions to the reduction of meat while leading to more sustainable diets.

Our results provide strong evidence as to which nutrients are the most limiting (bioavailable iron and zinc, vitamin A) when decreasing meat. Modeled dietary patterns included more fruits, vegetables and whole grain products, and were healthier than typical Western diets. These dietary changes led to a reduction in diet-related environmental pressures. Some nutrients were never at issue when simulating a transition toward meat-free diets (such as protein and essential amino acids and vitamin B12). By identifying limiting nutrients and dietary solutions when reducing meat, our work provides a clear and detailed analysis of the importance of meat in sustainable diets.

Sommaire

Remerciements	2
Résumé.....	7
Abstract	8
Sommaire	9
Liste des figures.....	13
Liste des tableaux.....	15
Liste des annexes.....	17
Abréviations	18
Valorisation scientifique.....	21
Introduction générale.....	24
Chapitre 1 – Introduction bibliographique.....	27
I. Le régime alimentaire, facteur essentiel pour promouvoir une bonne santé.....	28
I.1. Rôle largement reconnu de l'alimentation en tant que déterminants des maladies chroniques non transmissibles	28
a. Certains facteurs alimentaires sont associés à des risques de pathologies	29
b. Des changements alimentaires au sein des régimes alimentaires permettent d'allonger la durée de vie	33
c. Les recommandations alimentaires de santé publique	35
I.2. Préoccupations sanitaires liées à la consommation de viandes rouge et transformée	38
a. Viande et risque de pathologies	38
b. Contribution des viandes aux apports en nutriments.....	41
c. Fer et anémie	44
d. Statut en zinc et santé	47
I.3. Couverture des références nutritionnelles lors du rééquilibrage animal/végétal.....	47
a. Négociations très complexes autour de l'équilibre entre les apports en produits animaux et en produits végétaux	47
b. Conséquence d'une végétalisation sous l'angle protéique	53
c. Qualité nutritionnelle globale des régimes végétalisés.....	55
d. Facteurs anti-nutritionnels et conséquences sur la biodisponibilité	59
Conclusion partielle de la première partie	64
II. Transition « proflexitarienne » de l'alimentation	65

II.1. Evolutions récentes des consommations de viande en France et dans d'autres pays à hauts revenus	65
a. Niveaux actuels de consommation de viande et tendances pour les années à venir 65	
b. Quelques évolutions opposées selon le type de viande, avec notamment une croissance de la consommation de la volaille au détriment du boeuf.....	67
II.2. Le « flexitarisme », un profil de consommation émergent.....	68
a. Définition et caractéristiques	68
b. Part des flexitariens en France et dans d'autres pays à hauts revenus	73
c. Motivations et contraintes à l'adoption d'un régime flexitarien	76
Conclusion partielle de la seconde partie	79
III. Les co-bénéfices potentiels environnementaux et de santé d'un passage à des régimes alimentaires plus végétalisés	80
III.1. Vers une alimentation durable.....	80
a. L'alimentation durable et ses différentes dimensions	80
b. Vers une alimentation qui préserve l'environnement dans un contexte d'augmentation de la population	83
c. L'augmentation de la part des végétaux dans le régime alimentaire est associée à des pressions environnementales moindres.....	85
III.2. Optimisation de régimes alimentaires, une approche multi-critère	88
a. L'optimisation est un outil puissant pour concevoir des régimes atteignant des objectifs multiples	88
b. L'optimisation sur des critères de santé, d'environnement, d'acceptabilité ou de coût	91
c. Prise en compte de l'acceptabilité culturelle dans les démarches prospectives	95
Conclusion partielle de la troisième partie	99
Chapitre 2 - Travaux de thèse	100
I. Justification des travaux - objectifs	101
I.1. Question de recherche n°1 : Modélisation de régimes alimentaires plus sains par rapport aux habitudes alimentaires des français selon différents scénarios de besoins en fer et zinc biodisponibles.....	104
Sous-question de recherche n°1.1 : Identification de régimes optimisés sur des critères de santé et d'acceptabilité	104
Sous-question de recherche n°1.2 : Flexibilité sur les besoins estimés en fer et zinc biodisponibles et impact sur la santé	106
Sous-question de recherche n°1.3 : Impact sur le risque lié à l'anémie ferriprive et les morts prématurées évitées	108

I.2. Question de recherche n°2 : Modélisation de transitions de baisse graduelle de la viande selon des objectifs de santé, tout en améliorant l'adéquation nutritionnelle et en préservant au mieux les autres habitudes alimentaires	109
Sous-question de recherche n°2.1 : Baisse graduelle de la viande totale	109
Sous-question de recherche n°2.2 : Analyse des freins nutritionnels et des leviers diététiques	112
I.3. Question de recherche n°3 : Modélisation de transitions de baisse graduelle de la viande de ruminants et impacts environnementaux	112
II. Projets de thèse.....	114
II.1. Projet n°1 : La modélisation de régimes alimentaires plus sains est largement limitée par les valeurs de référence actuelles du fer et du zinc biodisponibles	114
a. Résumé	114
b. Messages-clés	119
c. Article et données supplémentaires	119
II.2. Projet n°2 : Freins nutritionnels et leviers diététiques lors de la baisse de la consommation de viande : une étude d'optimisation des régimes alimentaires des adultes français (INCA3)	161
a. Résumé	161
b. Messages-clés	163
c. Article et données supplémentaires	163
II.3. Projet n°3 : Moyens diététiques permettant de réduire et d'éliminer la viande de ruminants dans des régimes sains et nutritionnellement adéquats, et repercussions en termes de pressions environnementales associées aux régimes	237
a. Résumé	237
b. Messages-clés	239
c. Article et données supplémentaires	239
Chapitre 3 – Discussion	341
I. Discussion générale	342
a. Aspects méthodologiques de la thèse	345
b. Caractériser l'importance du conflit théorique attendu entre les transitions vers des régimes alimentaires végétalisés, et le respect des valeurs de référence actuelles du fer et du zinc biodisponibles	350
c. Apport de cette thèse à l'analyse des freins nutritionnels et leviers diététiques à la diminution de la consommation de viande (viande totale, puis viande de ruminants)	351
d. Rapport protéines animales/protéines végétales dans le régime alimentaire.....	356

II. Conclusion	357
III. Perspectives.....	358
a. Mieux caractériser les relations entre la variété et la diversité des catégories alimentaires et la qualité de l'alimentation	359
b. Mieux caractériser la variabilité des habitudes alimentaires dans la population....	360
c. Etudier les trajectoires possibles de changements et leur variabilité selon les typologies de consommation existantes	361
d. Prendre en compte d'autres paramètres de durabilité	362
e. Les actions stratégiques pour améliorer la durabilité des régimes.....	362
Annexes	365
Références.....	406

Liste des figures

Figure 1. Estimation des décès évités (si positif) ou ajoutés (si négatif) lors du passage du régime alimentaire moyen à des régimes simulés en remplaçant la viande par des analogues végétaux, ou en la remplaçant par des légumineuses.....	35
Figure 2. Exemple de nouveaux repères du Programme National Nutrition Santé (PNNS) 2019-2023 retenus par le Haut Conseil de la Santé Publique.....	38
Figure 3. Prévalence de l’anémie chez les hommes et les femmes (en âge de procréer ou ménopausées) selon l’âge.....	46
Figure 4. Proportions des produits animaux/végétaux dans les régimes alimentaires	48
Figure 5. Différences relatives dans les consommations par groupe alimentaire chez les individus mangeant peu de viande, de volaille ou de poisson, chez les végétariens et chez les végétaliens par rapport aux omnivores dans l'enquête prospective européenne sur le cancer et la nutrition (EPIC)-Oxford.....	50
Figure 6. Augmentation du score de modération et diminution du score d’adéquation (AS) avec l’augmentation du pourcentage de substitution des aliments protéiques animaux par les aliments protéiques végétaux.....	52
Figure 7. Représentation d’une assiette végétalienne : portions recommandées pour une journée chez un adulte sain	58
Figure 8. Contribution en pourcentage des types d'aliments à l'apport quotidien moyen en phytates des adultes âgés de 19 à 64 ans.....	60
Figure 9. Taux d’absorption du fer et quantité de fer biodisponible en fonction de l’apport en fer (à gauche) ou de l’apport en phytates (à droite).....	63
Figure 10. Consommation française de viande entre 2000 et 2020.....	68
Figure 11. Part des personnes ayant déjà entendu les termes caractérisant les différents types de régimes végétalisés	73
Figure 12. Cadre conceptuel des systèmes alimentaires – régimes alimentaires et nutrition	82
Figure 13. Émissions de GES (kg CO ₂ eq) par kilogramme d’aliment.....	84
Figure 14. Principe schématique du modèle d'optimisation non linéaire visant à identifier les régimes alimentaires de 152 pays, et qui intègre des critères d'acceptabilité culturelle, environnementaux, et nutritionnels	93
Figure 15. Relation entre le prix et les émissions de GES des menus optimaux	95

Figure 16. Schéma de l'acceptabilité dans la modélisation de régimes durables	98
Figure 17. Problème d'optimisation multi-critères, sous contraintes.....	105
Figure 18. Mode opératoire de l'étude selon l'âge retenue pour le recueil des consommations alimentaires.....	365
Figure 19. Analyse comparative des émissions de GES associées aux consommations alimentaires à partir des données de la base Agribalyse ou d'autres bases de données internationales chez les hommes (panneau A) et les femmes (panneau B) (enquête INCA3, n = 564 hommes et n = 561 femmes)	370

Liste des tableaux

Tableau 1. Consommations journalières recommandées par groupe alimentaire ou nutriment à éviter (fond rouge) ou à favoriser (fond vert), DALYs associés et évolution des recommandations entre 2017 et 2019	32
Tableau 2. Les régimes riches en viande rouge et transformée comme facteur de risque relatif à la charge de morbidité en Europe	40
Tableau 3. Effet d'une réduction de la consommation totale de viande rouge sur les apports moyens en fer et en zinc chez les adultes britanniques	43
Tableau 4. Prévalence de l'insuffisance d'apport ¹ en nutriment chez les végétariens, les végétaliens et les omnivores, d'après les données de l'étude Nutrinet-Santé 2009-2015 (n = 93 823).....	57
Tableau 5. Viande disponible à la consommation par kg/par habitant	67
Tableau 6. Définition et caractéristiques associées au flexitarisme dans 25 récentes études	71
Tableau 7. Part des flexitariens dans les 25 études mentionnées dans le tableau 6.....	75
Tableau 8. Consommations alimentaires (en g/j) et indicateurs environnementaux relatifs au régime moyen actuel des adultes néerlandais et relatifs à 4 scénarios avec différents objectifs de réduction des émissions de GES liés au système alimentaire	87
Tableau 9. Définition des fonctions objectives des différents types de méthodes d'optimisation utilisées pour concevoir des régimes alimentaires durables	90
Tableau 10. Apports en fibres, en riboflavine, en calcium, en choline, en potassium, en vitamines E, K et B12, en AGS et en sucres (par habitant et par jour) relatifs aux régimes actuels et optimisés pour les neuf régions du monde	94
Tableau 11. Questions de recherche traitées dans cette thèse et articles scientifiques associés	103
Tableau 12. Résumé des principaux éléments de discussion relatifs à chacune des questions de recherche, et comparaison avec d'autres études	344
Tableau 13. Evolution du rapport protéines animales/protéines végétales au cours de la trajectoire graduelle de diminution de la viande.....	357
Tableau 14. Nomenclature utilisée pour la classification des aliments présents dans la base INCA3.....	367

Tableau 15. Teneurs moyennes en protéines végétales et animales par groupe alimentaire chez les hommes et chez les femmes (en g/100g d'aliment 405

Liste des annexes

Annexe 1. Déroulé de l'étude INCA3 pour les participants	365
Annexe 2. Résumé des groupes alimentaires formés pour la catégorisation des aliments dans le cadre de cette thèse	366
Annexe 3. Incertitudes sur les données environnementales	368
Annexe 4. Un large éventail de proportions entre les protéines végétales et animales dans le régime alimentaire peut garantir la sécurité nutritionnelle et minimiser les risques pour la santé à long terme	371
Annexe 5. Teneurs moyennes en protéines végétales et animales par groupe alimentaire chez les hommes et chez les femmes (en g/100g d'aliment)	405

Abréviations

AA : Acide aminé

AAI : Acide aminé indispensable

ACV : Analyse de cycle de vie

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

AGPI : Acides gras polyinsaturés

AGS : Acides gras saturés

ALA : Acide α -linoléinique

ALSWH : Étude longitudinale sur la santé des femmes (Australie)/*Australian Longitudinal Study on Women's Health*

Anses : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

AS : Score d'adéquation/*Adequacy Subscore*

AVC : Accident vasculaire cérébral

CCAF : Enquête comportements et consommations alimentaires en France

CIQUAL : Centre d'information sur la qualité des aliments

CO₂ : Dioxyde de carbone

CP : Modélisation des compromis/*Compromise modeling*

CRÉDOC : Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie

DALYs : Années de vie pondérées par l'incapacité/*Disability Adjusted Life Years*

DD : Écart au régime initial/*Diet Departure*

DG AGRI : Direction générale chargée des politiques de la commission européenne concernant l'agriculture, le développement rural et la politique agricole commune

DHA : Acide docosahexaénoïque

DIAAS : Score de digestibilité des acides aminés indispensables/*Digestible Indispensable Amino Acid Score*

EFSA : Autorité européenne de sécurité des aliments

EPA : Acide eicosapentaénoïque

EPIC : Enquête prospective européenne sur le cancer et la nutrition

EREN : Équipe française de recherche en épidémiologie nutritionnelle

FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture

FBDG : Recommandations alimentaires basées sur l'alimentation/*Food-Based Dietary Guidelines*

FDC : Centre de données alimentaires/*FoodData Central*

Fe : Fer

Femmes Fe-/Fe+ : Femmes de besoin en fer bas/élevé

Flex : Flexible

FS : Ferritine sérique

GBD : Charge mondiale de la morbidité/*Globen Burden of Disease*

GES : Gaz à effet de serre

GNKQ : Questionnaire sur les connaissances générales en matière de nutrition/*General Nutrition Knowledge Questionnaire*

HCSP : Haut Conseil de Santé Publique

HDL : Lipoprotéines de haute densité/*High-Density Lipoprotein*

IC : Intervalle de confiance

IMC : Indice de masse corporelle

INCA : Etude individuelle nationale des consommations alimentaires (France)

LP : Programmation linéaire/*Linear programming*

MCV : Maladies cardiovasculaires

MS : Score de modération/*Moderation Subscore*

NFlex : Non flexible

NHANES : Enquête nationale sur la santé et la nutrition (Etats-Unis)

NOCs : Composés N-nitrosés/*N-nitroso Compounds*

NLP : Programmation non linéaire/*Non-linear programming*

LRNI : Apport nutritionnel minimal de référence/*Lower Reference Nutrient Intake*

OMS : Organisation mondiale de la santé

PNNS : Programme national nutrition santé

%PP : Pourcentage de protéines végétales

RNP : Référence nutritionnelle de population

RR : Risque relatif

SACN : Comité consultatif scientifique sur la nutrition (Grande-Bretagne) /*Scientific Advisory Committee on Nutrition*

TMREL : Niveau minimal théorique d'exposition au risque/*Theoretical Minimum Risk Exposure Level*

USDA : Département de l'agriculture des Etats-Unis/*U.S. Department of Agriculture*

YLD : Années de vie ajustées pour handicap/*Year of Life with Disability*

YLL : Années de vie perdues/*Year of Life Lost*

Zn : Zinc

Valorisation scientifique

Articles scientifiques

Faisant l'objet du travail de thèse (1^{er} auteur)

- Publiés :

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 – a diet optimization study in French adults.**

- En cours d'évaluation :

Dussiot A, Fouillet H, Perraud E, Salomé M, Huneau J-F, Kesse-Guyot E, Mariotti F. **Nutritional issues and dietary levers during gradual meat reduction – a sequential diet optimization study to achieve progressively healthier diets.**

Dussiot A, Fouillet H, Perraud E, Salomé M, Huneau J-F, Mariotti F, Kesse-Guyot E. **Dietary means to reduce and remove ruminant meat in healthy and nutrient-adequate diets and final alignment with lower environmental impacts.**

Faisant l'objet du travail de thèse (2^e auteur)

- En cours d'évaluation :

Fouillet H, Dussiot A, Perraud E, Wang J, Huneau J-F, Kesse-Guyot E, Mariotti F. **Plant to animal protein ratio in the diet: nutrient adequacy, long-term health and environmental pressure.**

Ne faisant pas l'objet du travail de thèse

- Publiés :

Kesse-Guyot E, Fouillet H, Baudry J, Dussiot A, Langevin B, Allès B, Rebouillat P, Brunin J, Touvier M, Hercberg S, *et al.* **Halving food-related greenhouse gas emissions can be achieved**

by redistributing meat consumption: Progressive optimization results of the NutriNet-Santé cohort.

Salomé M, Fouillet H, Nicaud M-C, Dussiot A, Kesse-Guyot E, Maillard M-N, Huneau J-F, Mariotti F. **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.**

Salomé M, Mariotti F, Nicaud M-C, Dussiot A, Kesse-Guyot E, Maillard M-N, Huneau J-F, Fouillet H. **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 cours d'évaluation :

Kesse-Guyot E, Allès B, Brunin J, Langevin B, Fouillet H, Dussiot A, Berthy F, Reuzé A, Péneau S, Rebouillat P, et al. **Shifting for nutritionally adequate plant-based diet requires in-depth reorganization of the diets.**

Kesse-Guyot E, Allès B, Brunin J, Fouillet H, Dussiot A, Berthy F, Perraud E, Herberg S, Mariotti F, Deschasaux-Tanguy M, et al. **Environmental impacts associated with UPF consumption: which food chain stages matter the most? Findings from a representative sample of French adults**

Kesse-Guyot E, Allès B, Brunin J, Langevin B, Fouillet H, Dussiot A, Berthy F, Reuzé A, Perraud E, Rebouillat P, et al. **Potential of vegetarian, pescovegetarian and meat-inclusive diets to comply with healthy and sustainable diets: low-meat diets are a good compromise in the general population.**

Communications

- Communications orales :

Edition 2021 du concours « *Ma thèse en 180 secondes* » organisé par l'*Université Paris-Saclay*

Dussiot A, Fouillet H, Perraud E, Salomé M, Huneau J-F, Kesse-Guyot E, Mariotti F. **Freins nutritionnels et leviers diététiques lors de la baisse de la consommation de viande : une étude d'optimisation des régimes alimentaires des adultes français (INCA3)**. Journées Francophones de Nutrition, Lille, 2021

- Communications affichées :

Dussiot A, Fouillet H, Wang J, Salomé M, Huneau J-F, Kesse-Guyot E, Mariotti F. **L'optimisation des consommations alimentaires sur des critères de santé est largement compromise par les valeurs des références actuelles en fer et en zinc absorbés**. Journées Francophones de Nutrition, en ligne, 2020

Dussiot A, Fouillet H, Wang J, Salomé M, Huneau J-F, Kesse-Guyot E, Mariotti F. **The Health Value of Modelled Healthy Eating Patterns Is Largely Constrained by the Current Reference Values for Bioavailable Iron and Zinc**. American Society for Nutrition, en ligne, 2021

Introduction générale

L'alimentation durable a été définie pour la première fois en 2010 par l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). « Un régime alimentaire durable est un régime dont la production agricole a un faible impact sur l'environnement, qui protège et respecte la biodiversité et les écosystèmes, et qui est nutritionnellement adéquat, sûr, sain, économiquement abordable et culturellement acceptable » (FAO, 2010). Parmi les dimensions qui caractérisent un régime alimentaire durable, le caractère sain a été rediscuté conjointement par la FAO et l'Organisation mondiale de la santé (OMS) en 2019 (WHO, FAO, 2019). Les recommandations alimentaires de l'OMS, l'étude sur la charge mondiale de la morbidité (GBD), et plus largement le corpus des études scientifiques sur les relations entre l'alimentation et la santé sont les trois piliers qui sous-tendent la définition d'une alimentation saine. Les recommandations alimentaires de l'OMS ont souligné l'importance d'augmenter les consommations de plusieurs aliments d'origine végétale (fruits, légumes, légumineuses, noix, et produits céréaliers complets), de limiter l'apport énergétique et notamment celui provenant des sucres libres et des graisses saturées, et de limiter la consommation de sel (WHO, 2020). La caractérisation des régimes alimentaires favorables à la santé par l'étude GBD complète les recommandations de l'OMS, et s'y aligne en quantifiant la part des risques liés à l'alimentation dans la charge des maladies non transmissibles. Les données de l'étude GBD ont notamment mis en évidence les risques de pathologie associés à une consommation élevée de viande transformée (GBD Risk Factors Collaborators, 2020). Globalement, les études sur les relations entre l'alimentation et la santé ont étayé des associations entre des consommations élevées de produits d'origine animale et d'aliments ultra-transformés, et des résultats médiocres en matière de santé (Huang *et al.*, 2021; Miller *et al.*, 2022).

Alors que l'agriculture compte parmi les facteurs majeurs de dégradation de l'environnement, et du dérèglement climatique, la nécessité d'une transition vers des régimes alimentaires plus durables figurent parmi les objectifs internationaux (Springmann, Clark, *et al.*, 2018; WHO, FAO, 2019). A l'horizon 2030 se profilent des régimes alimentaires avec peu ou pas de viande, qui devraient offrir des profils de consommation globaux plus sains, pour la santé humaine et planétaire (Broekema *et al.*, 2020; European Commission, 2019). C'est le cas du célèbre régime EAT-Lancet, ou des régimes de référence pesco-lacto-ovo-végétariens (Willett *et al.*, 2019; Nordic Council of Minister, 2014; Trichopoulou *et al.*, 2014; Barbier *et al.*, 2022).

Cependant, il a été avancé que ces régimes durables peuvent mettre en péril l'adéquation nutritionnelle, dans laquelle la viande joue un rôle crucial (Phillips *et al.*, 2015; Springmann, Wiebe, *et al.*, 2018). Alors que l'importance de la viande est devenue un sujet de société, c'est un sujet scientifique qui n'a pas été suffisamment exploré rationnellement par une approche d'analyse systémique, et les éléments probants restent fragmentaires.

Premièrement, la littérature fournit rarement une analyse approfondie de l'adéquation des régimes à faible teneur en viande, car la plupart des études se sont concentrées sur quelques nutriments, n'ont pas pris en compte l'ensemble du régime alimentaire ou la question complexe de la biodisponibilité des nutriments lors du passage à des régimes végétalisés (Barré *et al.*, 2018; Ferrari *et al.*, 2020; Mertens *et al.*, 2017; Seves *et al.*, 2017). Deuxièmement, l'analyse s'est surtout limitée à quelques régimes observés ou théoriques, sans tenir compte d'autres régimes possibles qui pourraient être plus sains et/ou plus proches des régimes existants (Broekema *et al.*, 2020; Kramer *et al.*, 2017; Perignon, Masset, *et al.*, 2016). Enfin, de nombreuses études ont porté sur quelques nutriments importants apportés par la viande (par exemple, les protéines, le zinc, la vitamine B12), sans analyser de manière hiérarchique dans quelle mesure les nutriments apportés par la viande sont effectivement critiques et quels remodelages du régime alimentaire pourraient offrir des solutions à la réduction de la viande tout en conduisant à des régimes plus sains et acceptables (EFSA, 2017; Anses, 2021; Tso and Forde, 2021; Salomé, Kesse-Guyot, *et al.*, 2021; WHO, FAO, 2005).

Dans la plupart des pays à hauts revenus, une partie non négligeable de la population diminue ou envisage de diminuer sa consommation de viande pour diverses raisons (Dagevos, 2021; de Gavelle, Davidenko, *et al.*, 2019). Cette tendance dite « flexitarienne » consiste en une consommation variable et très réduite en viandes et en produits carnés, sans les exclure totalement. L'objectif de cette thèse a été d'établir et de caractériser les régimes nutritionnellement les plus adaptés à des changements prospectifs de l'alimentation des français dans le sens d'une réduction de la consommation de viande, dans le but d'analyser les obstacles et les leviers aux échelles du nutriment et de l'aliment. En étude d'impact, nous avons cherché à décrire l'évolution des pressions environnementales (émissions de GES, utilisation des terres, ressources en eau, demande énergétique) associées aux régimes modélisés afin de quantifier l'amélioration en termes de durabilité environnementale qui pourrait être obtenue en réduisant la viande, et notamment la viande de ruminants.

Ce manuscrit présente, dans un premier chapitre, une introduction bibliographique composée de trois parties présentant 1) un état des lieux des relations entre l'alimentation et la santé, 2) les régimes flexitariens ou semi-végétariens caractérisés par un comportement alimentaire particulier d'éviction partielle et consciente des viandes, et 3) les co-bénéfices potentiels environnementaux et de santé d'un passage à des régimes alimentaires plus végétalisés. Un deuxième chapitre présentera les travaux de thèse, en justifiant préalablement les travaux effectués, puis en détaillant ces travaux, et en décrivant les méthodes et les résultats. Enfin, une troisième partie présentera la discussion de l'ensemble des travaux, et les perspectives envisageables à la suite de cette discussion.

Chapitre 1 – Introduction bibliographique

I. Le régime alimentaire, facteur essentiel pour promouvoir une bonne santé

Ce premier chapitre présente, dans une première sous-partie, un état des lieux des connaissances actuelles entre l'alimentation et les risques de mortalité prématurée et de morbidité, ainsi que les recommandations alimentaires de santé publique en vigueur dans les pays à hauts revenus qui découlent majoritairement des études épidémiologiques et qui incitent la végétalisation de nos assiettes. Cette végétalisation peut soulever des questions d'ordre nutritionnel, au sens des apports et du statut en nutriments. L'objectif de la seconde sous-partie est d'évoquer les nutriments qui peuvent poser problème quand la proportion des produits animaux pris dans leur ensemble diminue, et de discuter à quels points les produits végétaux peuvent être un levier. Autrement dit, la seconde sous-partie aborde la question de la couverture des apports en nutriments relatifs au régime principalement constitué de produits végétaux ou « végétalisé » par rapport à la norme culturelle occidentale. Les répercussions sur l'état nutritionnel spécifiques à la baisse de la viande seront abordées ensuite. En effet, la baisse de la viande pourrait poser des questions de sécurité nutritionnelle, définie comme l'adéquation de l'apport en nutriment permettant d'éviter un danger carenciel. Concernant la viande, les débats sociétaux actuels ont mis l'accent sur les dangers éventuels liés à un excès de sa consommation, ou au contraire sur les risques pour la santé humaine liés à des comportements d'éviction de la viande. Une troisième sous-partie recensera les principales préoccupations spécifiquement liées à la consommation de viande, en termes de santé à long terme et de sécurité nutritionnelle.

I.1. Rôle largement reconnu de l'alimentation en tant que déterminants des maladies chroniques non transmissibles

Cette sous-partie fait un état synthétique des connaissances sur les relations connues entre les groupes alimentaires et les risques de survenue de pathologies (a), et aborde dans quelle mesure l'alimentation prise dans sa globalité est susceptible de contribuer à leur prévention (b), puis les recommandations alimentaires de santé publique sont évoquées (c).

a. Certains facteurs alimentaires sont associés à des risques de pathologies

Parmi les études scientifiques (principalement de nature observationnelle) portant sur les relations entre les groupes alimentaires et le risque de pathologies chroniques, les revues systématiques présentent l'intérêt de prendre en compte un large panel d'études épidémiologiques et/ou expérimentales, ainsi que des méta-analyses. Miller *et al.* ont récemment résumé dans une revue systématique la qualité actuelle des niveaux d'association entre des facteurs alimentaires spécifiques d'une part, et les maladies cardio-vasculaires (MCV) et le diabète d'autre part. Parmi ces associations, 10 aliments, 3 boissons et 12 nutriments présentaient des niveaux au moins probables d'association avec les maladies coronariennes, les accidents vasculaires cérébraux (AVC) et/ou le diabète. La plupart des associations identifiées étaient protectrices ($n = 38$) et un plus petit nombre était nuisible ($n = 24$), avec un risque plus élevé associé à une consommation plus importante (Miller *et al.*, 2022). Concernant le risque de cancer, des consommations élevées de produits céréaliers complets, de légumes, de fruits et de produits laitiers, ainsi que des consommations faibles de viandes rouge et transformée seraient associées à un risque plus faible de certains cancers, notamment le cancer colorectal (Huang *et al.*, 2021; WCRF, 2018b; Schwingshackl *et al.*, 2018). Concernant l'effet protecteur des produits laitiers vis-à-vis du risque de cancer, des études plus précises seraient nécessaires pour préciser ces associations selon le type de cancer et en dissociant les produits laitiers (Jin and Je, 2021).

En France, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a réalisé une analyse bibliographique en 2016 visant à caractériser, d'un point de vue épidémiologique, les relations entre les groupes alimentaires et le risque des principales maladies non transmissibles (MCV, diabète de type 2, surpoids/obésité, cancers du sein, de la prostate et colo-rectal, santé osseuse et santé mentale), afin de fournir des bases scientifiques à l'actualisation des repères de consommations alimentaires du Programme national nutrition santé (PNNS) (Anses, 2016a). Concernant la viande rouge, la majorité des études épidémiologiques sur le cancer colorectal rapporte une augmentation statistiquement significative du risque à partir de 70 à 80 g/j (Anses, 2016a). Cette valeur rejoint la limite maximale de consommation individuelle de 350 à 500 g/semaine proposée par le Centre International de Recherche sur le Cancer (WCRF, 2018a). En ce qui concerne la charcuterie, l'analyse des études individuelles rapporte des augmentations significatives du risque dès 25

g/j (Anses, 2016a). Afin de clarifier les termes utilisés pour évoquer les différents types de viande, il convient dès à présent de rappeler les définitions classiquement utilisées, et qui le seront par la suite dans le présent manuscrit. Dans les publications scientifiques, la catégorie « viande rouge » (« red meat », en anglais) fait classiquement référence aux viandes bovine, ovine, porcine, caprine et chevaline. Dans le contexte français, cette catégorie est parfois traduite par « viandes de boucherie hors volailles ». Les viandes dites transformées (ou « processed meat ») se distinguent classiquement de la viande, dite « fraîche », et renvoient aux viandes qui ont subi des procédés de salage, fermentation, fumage ou cuisson. Au niveau international, les viandes transformées incluent les viandes appertisées (en conserve) alors qu'au niveau français, cette catégorie regroupe quasi exclusivement les charcuteries (INRAE, 2020; Anses, 2016b; Mariotti *et al.*, 2021).

Concernant les boissons sucrées, d'importantes augmentations de risque de prise de poids, de MCV et de diabète de type 2 ont été observées à partir d'un verre de boisson sucrée consommé par jour, sans information plus fine en-dessous de ce seuil (Anses, 2016b).

En revanche, les consommations de fruits et légumes diminueraient le risque de MCV avec un niveau de preuve convaincant (Angelino *et al.*, 2019), et la consommation de produits céréaliers complets diminuerait le risque de de MCV, de diabète de type 2, et de cancer colorectal avec un niveau de preuve probable (Aune *et al.*, 2016; Nirmala Prasadi V. and Joye, 2020; Anses, 2016a). A partir de 45 études prospectives, Aune *et al.* ont quantifié la relation dose-réponse entre la consommation de produits céréaliers complets et le risque de maladies cardiovasculaires, de cancers et de mortalité prématurée. Des réductions du risque ont été observées jusqu'à une consommation de 210-225 g/jour (~7 portions/j) de produits céréaliers complets pour la plupart des résultats. Peu d'éléments probants d'une association avec les produits céréaliers raffinés, telles que le riz blanc, ont été observées (Aune *et al.*, 2016). Par ailleurs, les consommations de noix et de légumineuses ont également été associées à plusieurs avantages pour la santé (cancer, MCV et mortalité prématurée) (Martini *et al.*, 2021).

La charge mondiale de la morbidité ou Globen Burden of Disease (GBD) de 2019 est une évaluation récente en épidémiologie descriptive, qui fait état de l'incidence, de la prévalence et de la mortalité de 369 maladies pour 204 pays et territoires de 1990 à 2019. La nature exhaustive de l'évaluation fournit des informations pertinentes pour les pouvoirs publics

sur les tendances des principales causes de charge au niveau mondial, régional et par pays ou territoire (GBD Risk Factors Collaborators, 2020). Les recommandations alimentaires du GBD correspondent aux apports recommandés associés à un risque de maladie minimum ou Niveau minimal théorique d'exposition au risque (TMREL), ce risque étant estimé au niveau de la population (**Tableau 1**) (GBD Risk Factors Collaborators, 2020). Pour les facteurs de risques délétères, dont les fonctions de risque augmentent de façon monotone avec l'exposition, le GBD a généralement supposé que le TMREL est égal à 0 (Murray and Lopez, 2013). Par exemple, dans le cadre de l'actualisation du GBD 2019 par rapport à la version de 2017, la limite de consommation de la viande rouge a été revue à la baisse, passant de 25 g/j maximum à 0 g/j. Pour les facteurs de risque dits « protecteurs » dont les fonctions de risque diminuent de façon monotone avec l'exposition (comme la consommation de fruits ou de produits céréaliers complets), il est plus difficile de sélectionner le niveau d'exposition qui représente le risque minimum. L'extrapolation de la fonction de risque au-delà du niveau où les études de cohorte (ou autres essais disponibles) soutiennent un effet protecteur maximal pourrait facilement conduire à des estimations exagérées, et finalement à des recommandations de consommation peu plausibles. Pour éviter cela, les auteurs ont fixé le TMREL pour les risques protecteurs à un niveau égal à une moyenne pondérée des 85^e percentiles de l'exposition dans les populations étudiées. Le 85^e percentile est arbitraire, mais l'analyse de sensibilité n'a pas suggéré de changements majeurs en choisissant le 80^e ou le 90^e percentile (GBD Risk Factors Collaborators, 2020). Le GBD prend en considération des groupes alimentaires qui n'étaient pas considérés dans la synthèse française de l'Anses évoquée précédemment. D'après les données du GBD, le lait notamment est considéré parmi les aliments à favoriser (Fadnes *et al.*, 2022; GBD Risk Factors Collaborators, 2020), même si cela fait encore débat au sein de la communauté scientifique, par exemple, la FAO ne donne aucune recommandation d'apport sur le lait. Le TMREL du GBD est très élevé pour le lait, et il l'est également pour les légumineuses, respectivement de 400-520 g/j et de 250-290 g/j. Pour comparaison, pour le lait, les 95^e centiles de consommation dans l'étude individuelle nationale des consommations alimentaires (INCA3) sont de 343 g/j (Δ TMREL > +17%) chez les hommes de 18 à 64 ans, et de 322 g/j (> +24%) chez les femmes de 18 à 54 ans. Pour les légumineuses, les 95^e centiles de consommation sont respectivement de 86 g/j (> +191%) et 43 g/j (> +481%).

Pour chaque groupe alimentaire, le **Tableau 1** indique les années de vie pondérées par l'incapacité (DALYs), estimés à l'aide du GBD Results Tool (GBD, 2022). Les DALYs sont une mesure normalisée de la charge de morbi/mortalité (notamment spécifiques à l'âge et à la localisation géographique). Cette métrique mesure le nombre d'années perdues du fait de vivre avec une maladie ou de mourir avant une espérance de vie prédéterminée, en intégrant deux composantes : la composante mortalité prématurée estimée en années de vie perdues (YLL) et la composante morbidité estimée en années de vie ajustées pour handicap (YLD).

Groupe alimentaire	TMREL (GBD 2017)	TMREL (GBD 2019)	DALYs, France	Sens du changement
Viande rouge	18-27 g/j	0	49386	↓
Viande transformée	0-4 g/j	0	20634	↓
Boissons sucrées	0-5 g/j	0	5896	↓
Acides gras saturés	0-1% AET	0		↓
Sodium	1-5 g/j	1-5 g/j		→
Fruits	200-300 g/j	320-325 g/j	29643	↑
Produits céréaliers complets	100-150 g/j	135-165 g/j	42392	↑
Lait	350-520 g/j	400-520 g/j	6248	↑
ω3 apportés par les produits de la mer (EPA+DHA)	0.2-0.3 g/j	0.6-0.65 g/j		↑
Légumes	290-430 g/j	250-290 g/j	12432	↓
Noix et graines	16-25 g/j	14-18 g/j	7885	↓
Légumineuses	-	95 g/j	20490	
Fibres	19-28 g/j	22-23 g/j		↓
Acides gras polyinsaturés	9-13% AET	8-12% AET		↓
Calcium	1-1.5 g/j	1.05-1.08 g/j		↓

AET, apport énergétique total; DHA, acide docosahexaénoïque; EPA, acide eicosapentaénoïque ; GBD, Globen Burden of Disease ; DALYs, Disability Adjusted Life Years; TMREL, Theoretical Minimum Risk Exposure Level
 Les DALYs associés aux TMREL s'interprètent en nombre d'années de vie épargnés/perdus selon le caractère sain/malsain de l'aliment considéré.

Tableau 1. Consommations journalières recommandées par groupe alimentaire ou nutriment à éviter (fond rouge) ou à favoriser (fond vert), DALYs associés et évolution des recommandations entre 2017 et 2019

(d'après GBD, 2019)

Une vaste revue systématique incluant 152 études observationnelles, a rapporté qu'un régime alimentaire riche en nutriments (autrement dit, contenant des aliments à forte teneur nutritionnelle) serait associé à une réduction du risque de décès toutes causes confondues (English *et al.*, 2021).

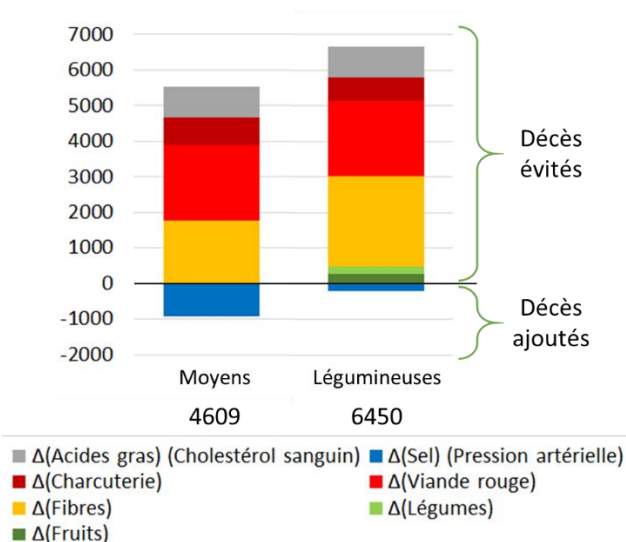
b. Des changements alimentaires au sein des régimes alimentaires permettent d'allonger la durée de vie

A l'échelle des régimes alimentaires, des modèles permettent d'évaluer les différences de mortalité prématurée ou de pathologies chroniques qui seraient induites par des scénarios de modification du comportement alimentaire. Plusieurs chercheurs ont estimé le nombre d'années de vie perdues ou en mauvaise santé qui seraient évitées par le remplacement de la consommation d'un aliment par un autre, souvent le remplacement des viandes par des sources protéiques végétales (Fadnes *et al.*, 2022; Scarborough, Harrington, *et al.*, 2014; Stylianou *et al.*, 2021). Tout récemment, Fadness *et al.* ont développé un modèle d'aide à la décision qui prédit comment les choix alimentaires affectent l'espérance de vie et utilise la méthode des tables de survie pour estimer comment l'espérance de vie évolue en fonction de changements durables dans les consommations de viandes rouge et transformée, de boissons sucrées, fruits, légumes, produits céréaliers, noix, légumineuses, poisson, œufs, et produits laitiers. Comparé au régime occidental standard, le régime optimal comportait des consommations réduites de viandes (rouge et transformée), de boissons sucrées et de produits céréaliers raffinés, ainsi que des consommations sensiblement plus élevées de fruits et légumes, produits céréaliers complets, légumineuses, et poisson, et comprenait une poignée de noix. Les gains devraient être d'autant plus importants que les changements alimentaires sont entrepris tôt dans la vie. Un passage du régime occidental standard au régime optimal à partir de l'âge de 20 ans augmenterait l'espérance de vie de plus d'une décennie pour les femmes (10,7 ans [95% UI 8,4 à 12,3]) et les hommes (13,0 ans [95% UI 9,4 à 14,3]) vivant aux États-Unis. Cependant, les auteurs ont précisé qu'un changement durable de régime alimentaire apporterait des gains de santé substantiels pour les personnes de tous âges (Fadnes *et al.*, 2022).

Afin d'évaluer dans quelle mesure l'amélioration du régime alimentaire des français permettrait de réduire les décès par maladies chroniques, Salomé *et al.* ont simulé différents

scénarios de substitution de la viande par différentes catégories d'analogues végétaux améliorant ou dégradant le score PANDiet. Ce score mesure la probabilité à l'échelle individuelle que les apports en nutriments soient adéquats par rapport aux références nutritionnelles françaises. Il est la moyenne de deux sous-scores, à savoir le score d'adéquation (AS), qui évalue pour 27 nutriments les probabilités que les apports soient supérieurs aux références nutritionnelles, et le score de modération (MS) qui évalue pour 6 nutriments (dont les apports sont à limiter) les probabilités que les apports ne dépassent pas une valeur maximale. Chaque sous-score varie de 0 à 100, et plus le score est élevé, plus on peut considérer que l'alimentation est de bonne qualité nutritionnelle. Ainsi, les analogues végétaux du marché dont la composition nutritionnelle moyenne augmentait/réduisait le plus le PANDiet ont été regroupés respectivement dans des catégories « Meilleurs »/« Pires ». Une catégorie supplémentaire « Légumineuses » regroupait les 13 types de légumineuses répertoriés dans l'étude INCA3. Les auteurs ont conclu que les substitutions permettraient d'éviter entre 3 000 morts/an avec le scénario « Pires », et jusqu'à 6 500 morts/an avec le scénario « Légumineuses » (**Figure 1**) (Salomé, Fouillet, *et al.*, 2021).

Globalement, les données de la littérature suggèrent que les habitudes alimentaires des adultes qui impliquent une plus grande consommation de fruits, légumes, produits céréaliers complets, légumineuses, noix, huiles végétales insaturées, poisson et viande maigre ou volaille (lorsque la viande est incluse) sont associées à des diminutions du risque de MCV et/ou de mortalité toutes causes confondues (English *et al.*, 2021; Guasch-Ferré *et al.*, 2019; Hidayat *et al.*, 2022; Julia *et al.*, 2021). Cependant, les études de cohortes prospectives, qui génèrent la plupart des données sur les relations entre les régimes alimentaires et les maladies, présentent quelques limites méthodologiques, telles que l'erreur de mesure de l'apport alimentaire ou encore les corrélations entre composantes de l'alimentation (INRAE, 2020).



Les analogues végétaux du marché ont été regroupés respectivement dans des catégories « Meilleurs »/« Pires » selon leur capacité à améliorer la qualité de l’apport en nutriment de l’alimentation. Ici, seule une catégorie « Moyens » est représentée.

Figure 1. Estimation des décès évités (si positif) ou ajoutés (si négatif) lors du passage du régime alimentaire moyen à des régimes simulés en remplaçant la viande par des analogues végétaux, ou en la remplaçant par des légumineuses

(adapté de Salomé, 2021)

c. Les recommandations alimentaires de santé publique

L’élaboration des recommandations alimentaires actuelles s’inscrit dans le processus en aval des travaux scientifiques en lien avec la durabilité des régimes alimentaires. Au niveau international, l’OMS formule des directives visant à favoriser des choix alimentaires sains à l’intention des gouvernements désireux de mettre en œuvre ces stratégies (WHO, 2020; Steele *et al.*, 2021). Au niveau national, une centaine de pays disposent de guides diététiques fondés sur l’alimentation qui permettent de considérer les spécificités culturelles de l’alimentation. Chacun de ces guides visent à prendre en compte les considérations culturelles, géographiques et sanitaires propres à son pays d’origine, contribuant ainsi à la politique nutritionnelle nationale. Tous ces guides mettent l’accent sur des consommations diversifiées de plusieurs groupes alimentaires (Comerford *et al.*, 2021; Cámara *et al.*, 2021). Cámara *et al.* ont examiné les recommandations alimentaires basées sur l’alimentation (FBDG) de plusieurs pays, et ont conclu que celles-ci incluaient fréquemment des recommandations

pour les fruits, les légumes, les produits céréaliers, les légumineuses, les noix, le lait et les produits laitiers, la viande et ses dérivés, le poisson, les œufs, l'eau et l'huile. Cependant, les auteurs ont constaté des différences remarquables concernant les quantités recommandées selon les pays (Cámara *et al.*, 2021). En France, le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP) a établi des repères de consommation officiels qui sont intégrés au PNNS4. Ainsi, les principaux groupes d'aliments sont représentés dans ce Plan, et ce qui est à noter dans la dernière version est l'apparition de limites supérieures de consommation pour plusieurs produits d'origine animale, ainsi que la distinction d'un nouveau groupe qui est celui des légumineuses, en raison de son intérêt pour notre santé par le biais des apports en fibres, en protéines et en minéraux ainsi que sa teneur en glucides à faible index glycémique. La réduction mais non la suppression de la consommation de produits d'origine animale associée à une augmentation de la consommation d'une diversité de produits végétaux non raffinés, et à une baisse de la consommation de produits sucrés et de charcuteries notamment permettraient d'améliorer la qualité nutritionnelle de notre alimentation (**Figure 2**) (HCSP, 2018; Anses, 2016b). En l'état actuel des connaissances, les recommandations alimentaires françaises actuelles ne sont pas d'éviter les consommations de viande rouge et de charcuterie, mais de les limiter respectivement à 500 g/semaine et à 150 g/semaine. Ces recommandations sont donc des messages de réduction et non d'exclusion avec comme cible principale les forts consommateurs, qui représentent une partie non négligeable de la population française (Anses, 2017), 82% des adultes en France ayant une consommation moyenne de viande rouge conforme à la recommandation, d'après l'enquête sur les comportements et les consommations alimentaires en France (CCAF) 2019 du Centre de recherche pour l'étude et l'observation des conditions de vie (CRÉDOC) (Interbev, 2022).

Comme on le développera dans la troisième partie de ce chapitre, la nécessité de passer à des systèmes alimentaires plus durables est reconnue à l'échelle mondiale. Plusieurs pays ont d'ores et déjà intégré des éléments de durabilité dans leurs guides alimentaires afin de promouvoir des recommandations durables, c'est-à-dire qui s'inscrivent dans les objectifs de développement durable, prenant en compte les dimensions environnementales, nutritionnelles, et économiques de l'alimentation, ainsi que l'acceptabilité des changements alimentaires par la société et les consommateurs (Cambeses-Franco *et al.*, 2022; Magkos *et al.*, 2019). Ces recommandations sont souvent basées sur l'origine des aliments, le

dénominateur commun de la plupart des recommandations étant de réduire la consommation d'aliments d'origine animale (Martin and Brandão, 2017) ou hautement transformés (Gómez-Donoso *et al.*, 2019; Monteiro *et al.*, 2018). Les recommandations de la plupart des pays préconisent de consommer de la viande maigre avec modération, et beaucoup d'entre elles recommandent de limiter les consommations des viandes rouge et transformée (Cocking *et al.*, 2020). Ainsi, les régimes qui vont dans le sens du suivi des recommandations alimentaires sont en général des régimes plus végétalisés que les régimes actuels. Quelques travaux ont déjà évalué en étude d'impact l'intégration récente des considérations environnementales dans les recommandations alimentaires révisées. Selon Cambeses-Franco *et al.*, le « Mediterranean Diet » et les « Italian Dietary Guidelines » offriraient finalement les meilleurs profils du point de vue du changement climatique, parmi une série de guides alimentaires européens et américains (Cambeses-Franco *et al.*, 2022). Des auteurs ont simulé le suivi des recommandations alimentaires actuelles par l'ensemble des consommateurs français, et ont montré qu'elles pourraient contribuer à réduire les pressions environnementales liées à l'alimentation, si elles sont adoptées par une grande partie de la population (Kesse-Guyot *et al.*, 2020; Coelho *et al.*, 2016). Le passage du régime moyen observé à un régime théorique (respectant l'ensemble des recommandations alimentaires) réduirait l'impact carbone de -20%, la demande d'énergie cumulée de -12% l'eutrophisation de -20%, l'occupation des sols de -24% et l'acidification des sols de -29% (Coelho *et al.*, 2016). Une autre étude a montré qu'un régime théorique respectant le guide alimentaire allemand aurait une empreinte eau diminuée de 23% par rapport à l'empreinte eau du régime européen moyen (Vanham *et al.*, 2013).

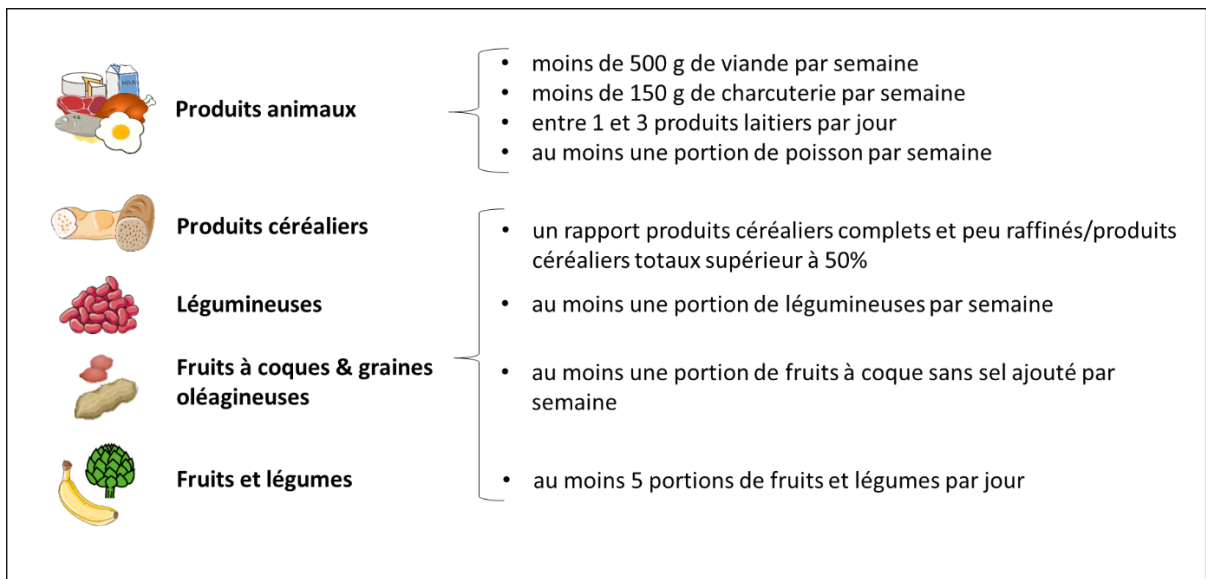


Figure 2. Exemple de nouveaux repères du Programme National Nutrition Santé (PNNS) 2019-2023 retenus par le Haut Conseil de la Santé Publique

(adapté de HCSP, 2018)

En résumé, les habitudes de consommation alimentaire actuelles dans les pays à hauts revenus doivent être revues afin d'améliorer la durabilité de l'alimentation, et par conséquent, les recommandations alimentaires actuelles préconisent une alimentation plus durable sur la base des connaissances scientifiques concernant les relations entre l'alimentation et la santé, mais également, plus récemment, pour répondre aux préoccupations environnementales.

I.2. Préoccupations sanitaires liées à la consommation de viandes rouge et transformée

a. Viande et risque de pathologies

Des études scientifiques datant des années 1960 rapportaient déjà que des hommes suivant un régime méditerranéen caractérisé par une consommation combinée moyenne de viande rouge et de volaille d'environ 35 g/j présentaient des taux très faibles de maladies coronariennes (Kromhout *et al.*, 1989; Willett *et al.*, 2019). Actuellement, dans la littérature, les effets sur la santé d'une réduction de la consommation des viandes rouge et transformée sont plutôt décrits comme protecteurs vis-à-vis du risque cardiometabolique (Abete *et al.*, 2014; Papier *et al.*, 2021), mais cette relation reste controversée, notamment en raison de nombreux facteurs de confusion (Fogelholm *et al.*, 2015; Grosso *et al.*, 2017; Wang *et al.*,

2022). En outre, la volaille serait à privilégier par rapport aux autres types de viande (Papp *et al.*, 2021).

En ce qui concerne le risque de mortalité prématurée, la méta-analyse de Wang *et al.* a mis en évidence que la consommation de viande transformée à une fréquence de 1 fois/j serait associée à une augmentation du risque de mortalité globale de 11% par rapport à des non-consommateurs ou à de relativement faibles consommateurs (RR=1,11 ; IC 95%=1,07-1,16), 2 fois/j de 19% (RR=1,19 ; IC 95%=1,13-1,24), 3 fois/j de 27% (RR=1,27 ; IC 95%=1,19-1,34) et 4 fois/j de 35% (RR=1,35 ; IC 95%=1,23-1,46). Concernant la viande rouge, les auteurs concluent que l'augmentation de sa fréquence de consommation n'était pas significativement associée à une augmentation du risque de mortalité globale (RR=1,05 ; IC 95%=0,93-1,19), sauf pour les études conduites sur la population d'Amérique du Nord (3 études) où le risque a significativement augmenté de 15% (RR=1,15 ; IC 95%=1,12-1,19) (Wang *et al.*, 2016). Cependant, plus récemment, d'autres auteurs ont conclu à l'inverse que l'association entre viande rouge et mortalité prématurée était globalement significative (Schwingshackl *et al.*, 2017).

Concernant la charge de morbidité, des auteurs ont rapporté une forte contribution d'une consommation élevée de viandes rouge et transformée à la charge de morbidité toutes causes confondues dans plusieurs pays européens en 2019 (**Tableau 2**) (IHME, 2019; EPHA, 2021). Dans la littérature et les avis des agences sanitaires, on reconnaît que les consommations des viandes rouge et transformée augmentent le risque de cancer colorectal et de prise de poids avec un niveau de preuve convaincant, et on considère qu'elles augmentent probablement le risque de cardiopathie ischémique et de diabète de type 2 (Papier *et al.*, 2021; Anses, 2016b). Les résultats de l'enquête prospective européenne sur le cancer et la nutrition (EPIC) sont en accord avec les dernières données des principales autorités en matière de prévention du cancer (Ubago-Guisado *et al.*, 2021). Des associations similaires ont été observées dans des analyses portant sur le diabète de type 2 (Pan *et al.*, 2013).

Zone géographique	Régime riche en viande transformée			Régime riche en viande rouge		
	Décès prématurés	YLD	DALYs	Décès prématurés	YLD	DALYs
Union européenne	13,31 1,5%	109,87 0,79%	337,18 1,04%	23,73 2,28%	120,86 0,86%	507,47 1,66%
France	10,32 (5,43-15,13) 1,13%	53,27 (32,05-79,7) 0,4%	202,57 (124,32-281,46) 0,75%	19,71 (13,34-26,6) 2,17%	76,74 (52,23-106,28) 0,57%	375,33 (277,49-473,55) 1,37%
Allemagne	19,46 (8,43-29,48) 1,72%	148,88 (89,1-227,6) 1,01%	431,56 (261,2-607,6) 1,34%	25,15 (13,99-36,75) 2,23%	144,03 (92,26-207,77) 0,97%	532,62 (349,3-715,3) 1,66%
Royaume-Uni	11,73 (4,67-18,32) 1,43%	134,44 (81,91-201,57) 0,94%	331,78 (202,1-465,3) 1,13%	13,29 (7,03-20,13) 1,28%	89,77 (55,37-133,3) 0,62%	311,57 (195,2-430,4) 1,07%

YLD, year of life with disability; DALYs, Disability Adjusted Life Years

Les chiffres entre parenthèses correspondent aux intervalles de confiance. Les pourcentages représentent la part relative à l'aliment (viande transformée ou rouge) par rapport à l'ensemble des facteurs de risque (alimentaire ou non). Les données sont extraites du GBD 2019.

Tableau 2. Les régimes riches en viande rouge et transformée comme facteur de risque relatif à la charge de morbidité en Europe

(traduit de European Public Health Alliance (EPHA), 2021,
Meat Production & Consumption (in Europe) and Public Health, p.12)

Ferguson *et al.* ont conduit une analyse transversale pour étudier l'association entre les régimes à base de produits végétaux (végétaliens, lacto-ovo-végétariens, pesco-végétariens, et semi-végétariens ou flexitariens) et le surpoids et l'obésité par rapport aux consommateurs réguliers de viande chez les femmes âgées de la cohorte d'une étude longitudinale australienne sur la santé des femmes (ALSWH). Le poids, l'indice de masse corporelle (IMC) et le tour de taille étaient statistiquement plus faibles chez les femmes qui suivaient un régime

végétalisé, et étaient positivement associés à l'augmentation de la consommation de viande. Les auteurs ont mentionné que les résultats étaient robustes après ajustement de plusieurs facteurs de confusion tels que le niveau d'activité physique, le tabagisme ou encore la consommation habituelle d'alcool (Ferguson *et al.*, 2021). Cependant, une limite de cette étude est que les consommations n'ont pas été ajustées sur l'apport énergétique, avec pour incidence que ce sont davantage les quantités consommées par la population qui sont évaluées que la qualité du profil alimentaire.

Par ailleurs, la consommation de viande est également associée à des risques sanitaires microbiologiques (antibiorésistance et risque de maladies infectieuses liées à l'élevage) et chimiques. Par exemple, la viande transformée par des processus industriels contient souvent des conservateurs, notamment des sels, qui peuvent avoir des effets négatifs sur la santé (INRAE, 2020).

b. Contribution des viandes aux apports en nutriments

Cette sous-partie a pour objectif de résumer la contribution des viandes aux apports en nutriments des adultes dans les pays occidentaux. Les viandes contribuent principalement aux apports en protéines, vitamine A, et en certaines vitamines du groupe B, ainsi qu'aux apports en minéraux essentiels comme le fer, le zinc et le sélénium; cependant, la viande transformée contribue à des proportions importantes d'AGS et de sodium dans les régimes alimentaires occidentaux.

Macronutriments

Les viandes, à savoir la viande rouge (incluant les viandes bovine, ovine, porcine, caprine et chevaline), la volaille, le gibier, les abats, et la charcuterie, ont en commun des protéines de qualité, en termes d'index chimique (reflétant, selon la définition de la FAO, la proportion d'AAI), et de digestibilité des AA (et donc de valeur biologique). Elles sont en teneurs variables se situant entre 10% et 25% pour la majorité des viandes.

La teneur lipidique est variable entre 2 et 30% (la majorité entre 5 et 15%) selon l'espèce animale et les pièces bouchères. La composition en acides gras dépend de l'espèce animale avec 30 à 50% d'AGS, 30 à 40% d'acides gras mono-insaturés et 5 à 10% d'acides gras polyinsaturés (AGPI). Contrairement aux protéines, certaines viandes issues de monogastriques (notamment volaille, lapin et porc) ont une composition en AGPI (n-36 et n-

63) et notamment en acide α -linoléique (ALA) variables selon l'alimentation animale (introduction de lin, luzerne). Par contre, leurs teneurs en EPA et DHA sont relativement faibles comparées aux teneurs dans les produits de la mer.

Certaines viandes, et notamment la charcuterie, ont des teneurs parfois élevées en AGS, ainsi qu'en sodium du fait des processus de fabrication et de salaison (Lecerf and Schlienger, 2020). Par ailleurs, des additifs alimentaires tels que les nitrates, les nitrites et les composés N-nitrosés (NOCs) sont également utilisés pour stabiliser les produits carnés (Talon *et al.*, 2015).

Minéraux

Comme évoqué, les viandes et abats constituent d'excellentes sources de minéraux tels que le fer, le zinc et le sélénium. Selon l'enquête CCAF du CRÉDOC, en 2019, la consommation moyenne de viande rouge d'un adulte français serait de 300 g/semaine, avec une fréquence de 2 à 3 fois/semaine. Toujours selon le CRÉDOC, au regard de l'ensemble de l'alimentation des Français, la consommation moyenne de viande rouge étant élevée, elle contribuerait donc aux apports en nutriments, à hauteur d'environ 19% de l'apport des Français en zinc, 13% de ceux en vitamine B12, 12,5% des apports en protéines, et 8% des apports en fer (Interbev, 2022).

Parmi les aliments les plus riches en fer, on trouve notamment les viandes (quel que soit leur type et notamment les abats), les poissons et fruits de mer, les légumineuses, les noix, les produits céréaliers, les œufs et les légumes à feuilles vertes (CIQUAL, 2017; Anses, 2021). Dans le cadre d'une alimentation équilibrée, riches en produits végétaux diversifiés, l'apport de viande n'est pas en soi indispensable pour disposer d'un bon statut en fer, un apport modéré de viande rouge permettra cependant de limiter le risque de déficience (INRAE, 2020). En effet, une réduction de la consommation de viande rouge pourrait conduire à des apports potentiellement insuffisants par rapport aux références nutritionnelles actuelles (**Tableau 3**) (SACN, 2010). Pour le fer et le zinc, ces références sont des références nutritionnelles de population (RNP), et représentent la quantité minimale de nutriments qui doit être apportée par l'alimentation pour satisfaire les besoins de toute la population. Concernant le fer, la RNP pour 97,5% de la population, correspond à un apport de 16 mg/j pour satisfaire les besoins en fer élevés de 20% des femmes pré-ménopausées, et de 11 mg/j en moyenne chez les hommes

et chez les femmes de besoin en fer bas (Anses, 2021). Ces références françaises sont assez similaires aux références internationales dans les pays occidentaux (Anses, 2016b).

	Estimated mean iron intake from all foods (mg/day) (95% CI)		Estimated mean zinc intake from all foods (mg/day) (95% CI)	
	Men	Women	Men	Women
2000/01 NDNS	13 (12.9–13.5)	10 (9.8–10.3)	10 (10.0–10.4)	7.5 (7.2–7.5)
Maximum red meat intake (g/day)				
180	13 (12.8–13.5)	10 (9.8–10.3)	10 (9.9–10.4)	7.4 (7.2–7.5)
120	13 (12.7–13.4)	10 (9.8–10.3)	9.9 (9.7–10.1)	7.4 (7.2–7.5)
100	13 (12.6–13.3)	10 (9.8–10.2)	9.7 (9.5–9.9)	7.4 (7.2–7.4)
90	13 (12.6–13.2)	10 (9.7–10.2)	9.5 (9.4–9.7)	7.3 (7.1–7.4)
80	13 (12.5–13.1)	10 (9.7–10.2)	9.4 (9.2–9.6)	7.2 (7.1–7.3)
70	13 (12.4–13.0)	9.9 (9.7–10.2)	9.2 (9.0–9.4)	7.1 (7.0–7.3)
60	13 (12.3–12.9)	9.9 (9.6–10.1)	8.9 (8.7–9.1)	7.0 (6.9–7.2)
50	13 (12.2–12.8)	9.8 (9.6–10.1)	8.7 (8.5–8.9)	6.9 (6.8–7.0)
0	12 (11.4–12.1)	9.2 (9.0–9.5)	7.0 (6.8–7.2)	5.6 (5.5–5.7)

Tableau 3. Effet d'une réduction de la consommation totale de viande rouge sur les apports moyens en fer et en zinc chez les adultes britanniques

(extrait de SACN, 2010, Iron and Health, p.145)

Le zinc est largement distribué dans les aliments (EFSA, 2014), et se retrouve principalement dans la viande (notamment les abats), le fromage, les légumineuses, les poissons et les fruits de mer (CIQUAL, 2017; Anses, 2021). Les références nutritionnelles du zinc pour une population type (de 58 à 68 kg pour une femme et de 68 à 79 kg pour un homme, avec un IMC de 22) sont entre 9 et 14 mg/j, selon les apports en phytates (0,3 à 0,9 g/j de phytates), les phytates diminuant l'efficacité d'absorption (Anses, 2021). Le zinc serait de 2 à 9 fois plus présent dans les produits carnés que dans les analogues et plats préparés végétariens sources de protéines, et le fer jusqu'à 3 fois plus (Cayot, 2021). Le fer hémique présent dans les viandes (40-70% du fer total selon l'espèce animal) bénéficie d'une meilleure biodisponibilité (10% du fer absorbé en moyenne) que celui des végétaux (2,5% du fer absorbé en moyenne) ou des produits laitiers (Hunt, 2003). L'efficacité d'absorption du fer lors de la consommation de produits carnés est en partie liée à la forme de l'ion (fer ferrique ou ferreux, ou encore fer

hémique c'est-à-dire associé à l'hémoglobine ou la myoglobine) et à l'absence de complexe comme les phénols et les phytates présents dans les végétaux.

Enfin, la viande apporte également des quantités importantes de sélénium (9,8 à 14,6 µg/100 g de viande de bœuf) (Bauchart *et al.*, 2008).

Vitamines

La vitamine A dans l'organisme humain est en réalité un ensemble de trois molécules proches structurellement, le rétinol, le rétinal (rétinol oxydé) et l'acide rétinoïque (produit d'oxydation du rétinal). La consommation de produits carnés apporte du rétinol. Les abats, et surtout les foies sont une source très importante de rétinol. Les foies de volailles cuits contiendraient de l'ordre de 20 000 µg/100g de rétinol, le foie de veau cuit en contiendrait environ 10 500, tandis qu'à titre de comparaison, la carotte cuite contiendrait en moyenne 3 340 µg/100g de β-carotène (le rétinol provient de l'hydrolyse du β-carotène consommé), les lentilles vertes cuites ou les pois chiches cuits très peu (en moyenne 17 et 13 µg/100 g respectivement) (CIQUAL, 2020).

De plus les produits carnés ont une teneur élevée en vitamines du groupe B (notamment B2, B6, B12), leur contribution aux apports observés étant variable mais parfois importante (Cayot, 2021).

c. Fer et anémie

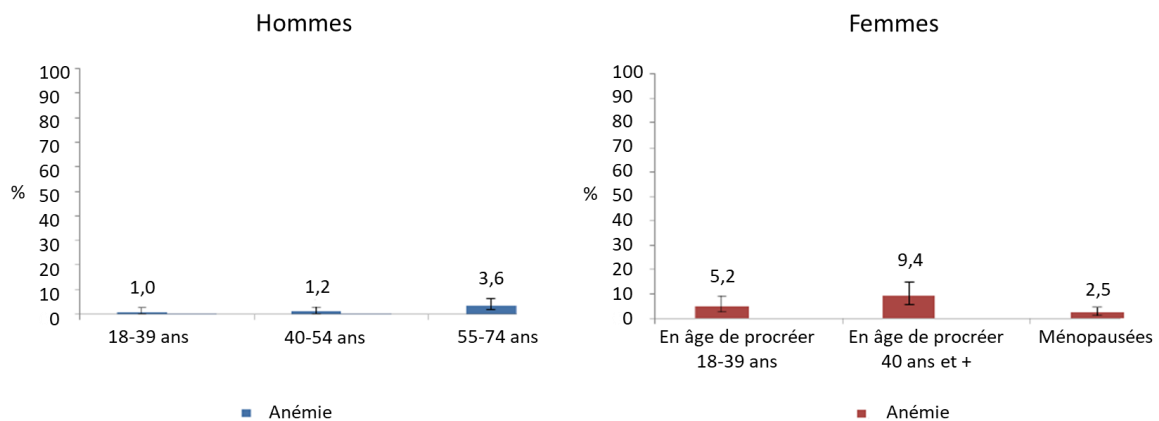
Le fer est le constituant essentiel de l'hémoglobine, une protéine des globules rouges (érythrocytes) qui permet le transfert d'oxygène des poumons vers les tissus périphériques. A elle seule, l'hémoglobine concentre plus de 75% du fer corporel. Le fer peut être stocké en quantité limitée au niveau hépatique, sous la forme de fer III associé à une protéine de réserve, la ferritine. La ferritine sérique (FS) est le reflet de l'état des réserves. Il est généralement admis qu'une FS ≤15 µg/L chez l'adulte signe l'absence complète de réserves en fer (déficience) et que ces réserves augmentent de 8 mg pour chaque µg/L supplémentaire au-delà de cette valeur seuil (Walters *et al.*, 1973). Les pertes en fer sont non régulables et liées au renouvellement cellulaire (desquamation, renouvellement des épithéliums digestifs) et aux saignements (saignements accidentels, pertes menstruelles chez les femmes en âge de procréer). Ces pertes sont en moyenne de $1,1 \pm 0,5$ mg/j chez l'homme ($n = 29$) et sont comprises entre 0,7 et 4,9 mg/j chez les femmes menstruées ($n = 15$), du fait de la forte

variabilité et de la forte asymétrie positive de la distribution des pertes menstruelles (Hunt *et al.*, 2009). L'homéostasie martiale est assurée par un contrôle de la biodisponibilité qui augmente lorsque les réserves hépatiques attestées par la FS diminuent, et fait intervenir l'hépcidine, un peptide régulateur produit par le foie (Ganz, 2013).

L'anémie est définie par une concentration sanguine en hémoglobine inférieure à 12 g/dL chez la femme et à 13 g/dL chez l'homme. Ses répercussions fonctionnelles et cliniques sont multiples et leurs sévérités croissent avec l'importance de la baisse de l'hémoglobine circulante (essoufflement, fatigue, troubles de l'attention, risque accru de prématurité, altération du développement cognitif). L'anémie est une des pathologies les plus fréquentes avec près de 1,8 milliard de cas dans l'ensemble du monde en 2019, soit une prévalence de 23 176 cas/100 000 habitants (Safiri *et al.*, 2021), les femmes étant plus concernées que les hommes. Les causes de l'anémie sont multiples (maladies génétiques, infections parasitaires et virales, dysplasies, carences en protéines, et vitamines A, B9 ou B12) mais on considère que la carence en fer est à l'origine de plus de la moitié des cas (66% chez les hommes et 56% chez les femmes) dans l'ensemble du monde (Safiri *et al.*, 2021). L'anémie par carence en fer, ou anémie ferriprive, est définie par une concentration en hémoglobine inférieure aux seuils définis et une déplétion totale des réserves en fer, attestée en absence d'inflammation par une FS inférieure à 15 µg/L, quel que soit le sexe (WHO, 2007). Elle s'accompagne d'une baisse du coefficient de saturation de la transferrine (protéine plasmatique assurant le transport de fer vers la moelle osseuse, lieu de synthèse de l'hémoglobine) qui passe de 30-40% à moins de 16%, et d'une hausse de la concentration de zinc protoporphyrine (une forme immature d'hémoglobine dans laquelle un atome de zinc remplace le fer). On considère généralement que l'anémie ferriprive est le résultat d'un déséquilibre chronique entre les pertes et les apports en fer, conduisant en premier à une baisse des réserves et de la FS suivie par la baisse du coefficient de saturation de la transferrine et celle de l'hémoglobine.

En France, l'enquête Esteban 2014-2016 rapporte une prévalence de l'anémie de 2% chez les hommes et de 5,1% chez les femmes. Cette prévalence croît avec l'âge chez les hommes (passant de 1% chez les 18-39 ans à 3,6% chez les plus de 55 ans) et décroît chez les femmes avec la ménopause (5,2% chez les femmes menstruées de 19 à 39 ans et 9,4% chez celles de plus de 40 ans contre 2,5% chez les femmes ménopausées) (**Figure 3**) (Santé Publique France, 2019a). La même étude rapporte que 11,9 % des femmes sont déficitaires en fer (FS < 15µg/L)

et 14% ont des réserves faibles (FS comprise entre 15 et 30 µg/L). Pour ces deux catégories, les proportions sont respectivement de 1,5% et 3,9% chez les hommes. Le pourcentage de femmes en âge de procréer présentant une anémie ferriprive (hémoglobine < 12 g/dL et FS < 15 µg/L) est de 2,8% chez les 18-39 ans et 5,5% chez les plus de 40 ans, confirmant le rôle majeur de la déficience en fer dans les causes de l'anémie dans des pays économiquement développés comme la France (*Santé Publique France, 2019a*).



Ces données concernent la population entière, intégrant les adultes ayant déclaré avoir pris des compléments alimentaires ou un traitement médicamenteux à base de fer.

Figure 3. Prévalence de l'anémie chez les hommes et les femmes (en âge de procréer ou ménopausées) selon l'âge

(adapté de Santé Publique France, 2019, étude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition, Esteban 2014-2016, p.29)

Les facteurs de risque de l'anémie ferriprive sont relativement bien décrits (Sun and Weaver, 2021), et le dépistage ciblé des individus à risque de déficience en fer peut permettre de prévenir la morbidité associée à l'anémie ferriprive. En population générale, il n'existe pas de preuve d'un rentement fonctionnel d'une déficience en fer en absence d'anémie, même si quelques travaux suggèrent qu'une supplémentation en fer de sujets déficients et non anémiques pourrait être associée à des améliorations marginales de la capacité aérobie maximale et de l'attention (Falkingham *et al.*, 2010; Pasricha *et al.*, 2014).

d. Statut en zinc et santé

Le zinc est le deuxième métal trace le plus abondant (après le fer) dans le corps humain (Foster and Samman, 2017). Le zinc joue un rôle dans de nombreux processus physiologiques, en permettant notamment l'activité de plusieurs centaines d'enzymes (rôle de coenzyme notamment) (Brown *et al.*, 2004; Salomé, Kesse-Guyot, *et al.*, 2021). Il n'existe pas de biomarqueurs adéquats du statut en zinc permettant d'estimer les besoins, et il est difficile de déterminer sa pertinence pour la santé (EFSA, 2017). Les adultes végétariens et végétaliens ont tendance à avoir des apports alimentaires en zinc ingéré et des quantités de zinc biodisponible plus faibles que les non-végétariens, en raison de leurs apports en phytates plus élevés, qui réduisent l'absorption du zinc (Foster *et al.*, 2013; Miller *et al.*, 2007). Cependant, les concentrations plasmatiques en zinc des adultes végétariens et végétaliens ne sont pas plus faibles que les non-végétariens, car la zincémie est soumise à une forte régulation homéostatique (Foster and Samman, 2017). Il ne semble pas y avoir de conséquences néfastes pour la santé chez les végétariens adultes qui soient attribuables à un statut en zinc plus faible (Foster and Samman, 2017). Même s'il est difficile d'associer une carence en zinc à des caractéristiques cliniques spécifiques, il s'est avéré que les carences sévères en zinc sont rares dans les pays à revenu élevé (Foster and Samman, 2017; Wuehler *et al.*, 2005). Néanmoins, on estime que des déficiences profondes en zinc pourraient affecter certaines fonctions associées au zinc, comme la réponse immunitaire (Wessels *et al.*, 2021).

1.3. Couverture des références nutritionnelles lors du rééquilibrage animal/végétal

a. Négociations très complexes autour de l'équilibre entre les apports en produits animaux et en produits végétaux

Dans les pays industrialisés, l'alimentation actuelle est dominée par les produits animaux avec ~70% de protéines animales dans l'apport global, tandis qu'au niveau mondial, c'est l'inverse en nombre de consommateurs, avec seulement ~35% de l'apport protéique qui est assuré par les produits animaux (Andreoli *et al.*, 2021). Il est possible de décliner toute une gamme de consommation de produits animaux en différents régimes végétalisés par rapport à la norme occidentale (flexitariens, végétariens, végétaliens) (**Figure 4**) (Andreoli *et al.*, 2021). Le rééquilibrage entre produits animaux et produits végétaux dans les régimes alimentaires fait l'objet de débats animés, mêlant des argumentaires d'ordres philosophique et scientifique,

sur des bases scientifiques en perpétuel renouvellement. Cette sous-partie aborde la question générale du rééquilibrage entre produits animaux/végétaux, tandis que les problématiques de sécurité nutritionnelle relatives au régime végétalisé seront abordées plus précisément dans les sous-parties suivantes.

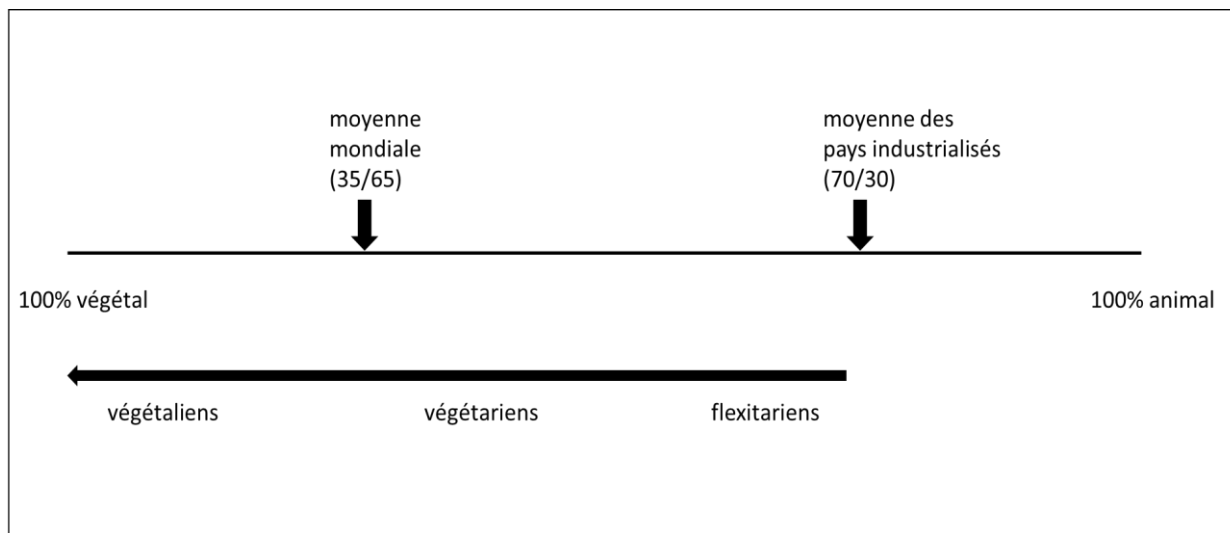


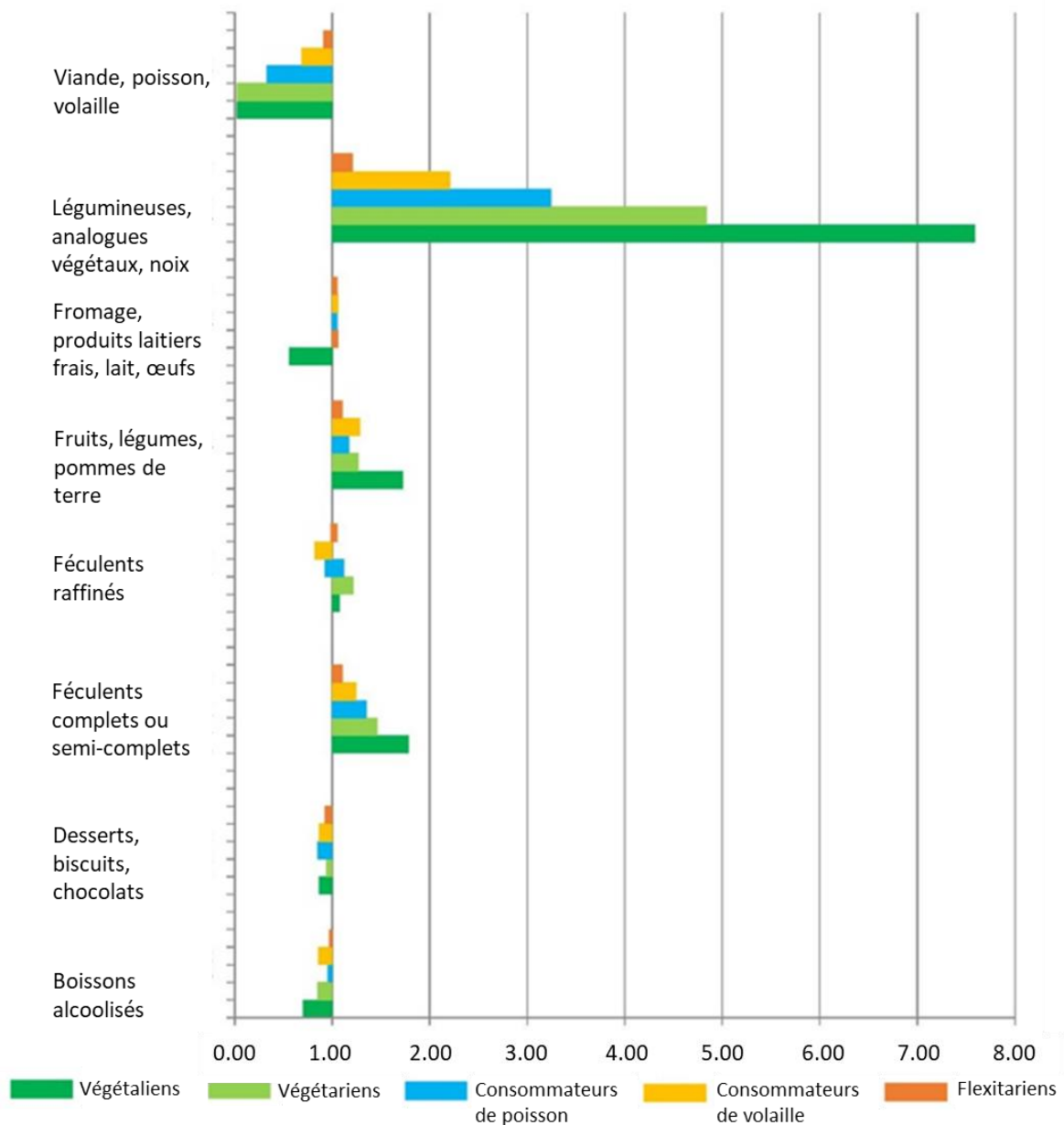
Figure 4. Proportions des produits animaux/végétaux dans les régimes alimentaires

(d'après Andreoli, 2021)

L'équilibre entre produits animaux et produits végétaux ne peut pas être dissocié de la couverture de l'ensemble des références nutritionnelles relatives aux macro et micro-nutriments. Ainsi, la question parfois posée est de savoir jusqu'à quel pourcentage la consommation de protéines animales peut être réduite sans accroître le risque de carence relatif aux autres nutriments. Au-delà des normes sociales associées à la consommation et au goût des produits animaux, la littérature disponible mentionne parfois la mise en péril potentielle du « paquet protéines » lié à la valeur biologique élevée des produits animaux (Lonnie and Johnstone, 2020; Mariotti and Gardner, 2019). Il est souvent considéré que l'enjeu est avant tout une question de protéines, et par souci de clarté, le ratio « protéines animales/protéines végétales » est souvent discuté au lieu du ratio « produits animaux/produits végétaux ». Cependant, il a été démontré que la malnutrition protéique est rare dans les pays à hauts revenus, sauf chez des sous-populations spécifiques à risque d'apports défailants en protéines (par exemple parmi les personnes âgées ou fragiles), dans la mesure où les apports totaux en protéines sont couverts sur le plan quantitatif, et lorsque

les besoins totaux en protéines sont couverts, les apports en acides aminés (AA) sont rarement limitants (Clark *et al.*, 2020). Plusieurs auteurs ont examiné la contribution aux apports énergétiques des groupes alimentaires à teneurs élevées en protéines (viande, poisson, produits laitiers, œufs, légumineuses, noix, et analogues végétaux) chez différents profils de consommateurs (omnivores, végétariens, végétaliens) (Allès *et al.*, 2017; Baudry *et al.*, 2016; Bradbury *et al.*, 2017). Par exemple, Bradbury *et al.* ont examiné la contribution aux apports énergétiques des groupes alimentaires à teneurs élevées en protéines (viande, poisson, produits laitiers, œufs, légumineuses, noix, et analogues végétaux) chez différents consommateurs, recensés dans la base de données « UK Biobank » et ayant effectué au moins une évaluation alimentaire de 24 heures sur Internet ($n = 199\ 944$). Chez les consommateurs réguliers de viande, les végétariens ou les végétaliens, environ 25%, 20% et 15% respectivement de l'énergie totale provenait de ces groupes alimentaires (**Figure 5**) (Bradbury *et al.*, 2017). Certains auteurs ont également souligné que la quantité et la qualité des protéines végétales sont souvent sous-estimées ou mal appréhendées (Mariotti and Gardner, 2019).

D'une part, la végétalisation favorise des apports en certains nutriments préoccupants, c'est-à-dire les nutriments qui sont souvent consommés en quantité insuffisante dans la population et dont l'insuffisance d'apport peut avoir des conséquences sévères. D'autre part, elle s'accompagne d'une réduction des apports en nutriments classiquement apportés par les produits animaux dans les régimes actuels puisque chaque groupe alimentaire a ses spécificités propres. Par exemple, les produits végétaux sont intéressants pour leurs teneurs élevées en fibres, en vitamine C, en glucides complexes, ainsi qu'en autres substances chimiques telles que les composés phytochimiques, ou encore pour leurs teneurs réduites en acides gras saturés (AGS), tandis que la viande est un bon contributeur en fer biodisponible dans l'alimentation occidentale, et tandis que le lait et les produits laitiers contribuent largement aux apports en calcium et en iode.



La consommation moyenne par rapport aux consommateurs réguliers de viande ou omnivores (1,00) est indiquée, pour chaque groupe alimentaire après ajustement sur l'âge.

Figure 5. Différences relatives dans les consommations par groupe alimentaire chez les individus mangeant peu de viande, de volaille ou de poisson, chez les végétariens et chez les végétaliens par rapport aux omnivores dans l'enquête prospective européenne sur le cancer et la nutrition (EPIC)-Oxford

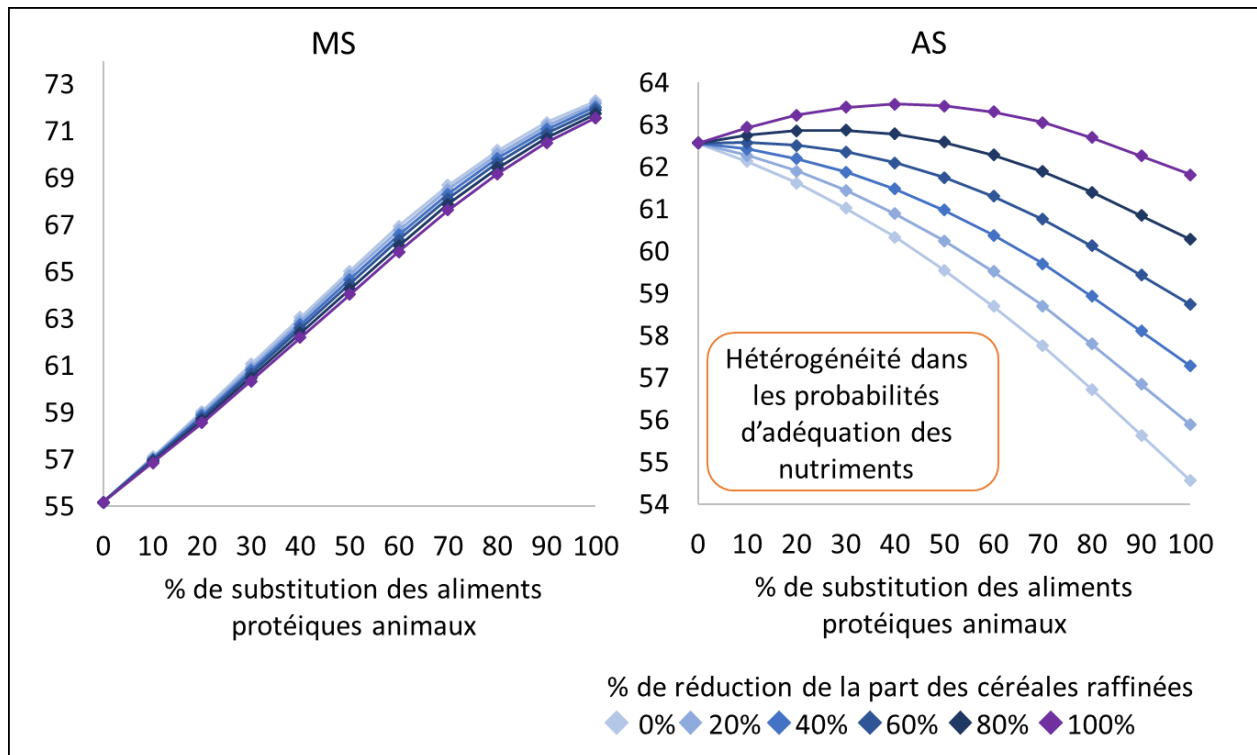
(d'après Bradbury, 2017)

Plusieurs études ont conclu que des régimes végétalisés (à l'exception du régime végétalien) pourraient être adéquats sur le plan nutritionnel (Allès *et al.*, 2017; de Gavelle *et al.*, 2018; Tso and Forde, 2021). A partir des données de l'enquête nationale sur la santé et la nutrition (NHANES) 2017-2018, et en comparant des régimes végétalisés appariés sur les calories à un régime omnivore de référence, Tso et Forde ont conclu que tous les régimes végétalisés (à l'exception du régime végétalien) répondraient aux besoins en nutriments préoccupants (calcium, potassium, magnésium, phosphore, zinc, fer et vitamine B12), et seraient plus pauvres en AGS, sodium et sucres que le régime de référence (Tso and Forde, 2021).

Afin de pouvoir apporter des connaissances factuelles pour éclairer le débat actuel sur les aspects nutritionnels très complexes qui sont associés à l'équilibre entre produits animaux et produits végétaux, les études scientifiques doivent parvenir à intégrer dans les modèles toute la complexité de l'alimentation. L'association entre la contribution des produits végétaux et la qualité de l'alimentation a été documentée dans la littérature scientifique, et cette association est parfois estimée par des approches holistiques à l'origine du développement de scores alimentaires. Par exemple, il a été documenté dans la littérature scientifique un indice « alimentation saine » plus élevé chez les personnes suivant un régime végétarien (Verger *et al.*, 2012).

La littérature disponible suggère qu'il serait possible d'augmenter fortement la part des produits végétaux dans l'alimentation sans menacer l'équilibre nutritionnel, mais que cela nécessite des combinaisons alimentaires appropriées. Les régimes végétalisés modélisés ne sont pas systématiquement durables, et leurs caractéristiques diététiques doivent être évaluées (Gehring *et al.*, 2021; Keaver *et al.*, 2021; Satija *et al.*, 2017). Par ailleurs, la catégorie des produits végétaux englobe à la fois des aliments faisant partie de catégories alimentaires favorables à la santé (tels que les légumineuses), et des aliments faisant partie de catégories alimentaires néfastes pour la santé (tels que des boissons sucrées ou des en-cas salés), et donc plusieurs profils alimentaires existent dans les régimes végétalisés. Par exemple, une étude a montré que l'augmentation de la consommation de légumineuses à 2 portions/semaine en substitution de la viande pouvait améliorer la durabilité des régimes alimentaires (sous réserve d'évaluer l'impact de cette substitution en termes d'acceptabilité culturelle, et de surveiller le statut en fer et zinc des individus à risque de carence) (Gazan *et al.*, 2021). Salomé *et al.* ont simulé le remplacement partiel ou total des protéines animales par des protéines végétales,

et ont conclu qu'il était nécessaire de garantir des consommations en produits végétaux très diversifiées afin de maintenir ou d'améliorer l'adéquation globale des apports en nutriments indispensables, c'est-à-dire que si l'alimentation actuelle des français (INCA3, 2014-2015) était maintenue avec de très fortes teneurs en produits céréaliers raffinés notamment, il devenait difficile de couvrir l'ensemble des références nutritionnelles (**Figure 6**) (Salomé *et al.*, 2020).



MS (score de modération) est la probabilité moyenne de l'adéquation de 6 nutriments pour lesquels il existe une valeur de référence supérieure.

AS (score d'adéquation) est la probabilité moyenne de l'adéquation de 28 nutriments dont l'apport habituel devrait être supérieur à une valeur de référence, multipliée par 100. Diversifier les sources de protéines végétales, en augmentant la part des céréales complètes, légumineuses et noix, permet de maintenir l'AS.

Figure 6. Augmentation du score de modération et diminution du score d'adéquation (AS) avec l'augmentation du pourcentage de substitution des aliments protéiques animaux par les aliments protéiques végétaux

(d'après Salomé 2020)

Les probabilités d'adéquation pour les acides gras à longues chaînes (EPA, acide eicosapentaénoïque et DHA, acide docosahexaénoïque), la vitamine B12 et le zinc

demeuraient dans tous les cas plus faibles, d'après les auteurs (Salomé *et al.*, 2020). Par ailleurs, des substitutions de la viande ou du lait par des analogues végétaux (disponibles sur le marché) affectaient peu la qualité globale du régime, bien que certains nutriments pouvaient devenir préoccupants (fer biodisponible et vitamine B12 lors de la substitution totale de la viande ; iode et calcium dans le cas d'une substitution du lait et des produits laitiers par des boissons végétales) (Salomé, Huneau, *et al.*, 2021). Pour évaluer l'impact nutritionnel d'une augmentation de la part végétale de l'alimentation jusqu'à un niveau extrême, des travaux d'optimisation de régimes alimentaires portant sur le rééquilibrage entre produits animaux et produits végétaux sont en cours, notamment au sein de l'Equipe française de Recherche en Epidémiologie Nutritionnelle (EREN).

Enfin, outre les aspects purement nutritionnels au sens strict, le remplacement occasionnel de la viande par des analogues végétaux (caractéristique des régimes « flexitariens ») pourrait favoriser des changements favorables dans le microbiome intestinal des consommateurs (Toribio-Mateas *et al.*, 2021).

b. Conséquence d'une végétalisation sous l'angle protéique

Concernant les protéines, une valeur de RNP chez l'adulte de 0,83 g de protéines de bonne qualité/kg poids corporel (pc) par jour a été retenue sur la base d'un consensus international (Anses, 2007; IOM, 2005; FAO, 2007; Mariotti, 2016; Rand *et al.*, 2003). Par définition, la RNP permet de couvrir les besoins en protéines pour la quasi-totalité de la population considérée. Dans la plupart des pays industrialisés, l'apport protéique de la population adulte générale se situe plutôt aux alentours de 1,3-1,4 g de protéines de bonne qualité/kg pc.j, soit ~60% au-dessus de la RNP (Anses, 2007; Dubuisson *et al.*, 2010; Fulgoni, 2008; Mariotti, 2016; Mariotti and Gardner, 2020). En France, la consommation est dominée par des sources protéiques animales, et essentiellement par les produits carnés (pour 55%) d'après les données INCA3 (Dubuisson *et al.*, 2019). Cette tendance se retrouve dans la majorité des pays à hauts revenus.

De très nombreux travaux relient la nature des sources protéiques à la santé. Une des caractéristiques majeures des produits animaux est leur teneur élevée en protéines considérées comme étant de bonne qualité nutritionnelle. Les conditions d'élevage modèleraient assez peu les teneurs en protéines et les profils en AA des produits animaux (INRAE, 2020). La qualité nutritionnelle des différentes sources protéiques varie en fonction

de la composition en AA, et notamment en acides aminés indispensables (AAI). Les protéines sont composées d'AA, parmi lesquels certains sont synthétisables par l'organisme, et d'autres non, et ceux qui ne sont pas synthétisables doivent être apportés par l'alimentation. Des AAI apportés en quantités insuffisantes limitent la synthèse protéique et réduisent l'efficacité métabolique de la protéine alimentaire. Il faut que l'AAI soit présent et biodisponible. La biodisponibilité est appréciée par des mesures de digestibilité, et s'avère plus faible pour les produits végétaux que pour les produits animaux. A partir de la composition en AAI et de leur biodisponibilité, il est possible de calculer des scores de qualité, tels que le score de digestibilité des acides aminés indispensables (DIAAS) proposé par la FAO (FAO, 2007). Ces scores sont souvent supérieurs pour les produits animaux que pour les produits végétaux quand ils sont pris isolément. Ces différences sont essentiellement liées à des différences de richesse relative en certains AA pour les produits végétaux. Un intérêt de ces scores est de pouvoir dégager des complémentarités entre sources protéiques (Brestenský *et al.*, 2019; Schaafsma, 2000). Le mélange des sources de protéines végétales, tel que le mélange produits céréaliers/légumineuses, comme cela est pratiqué généralement par les végétariens, annihilerait tout risque d'insuffisance (Mariotti and Gardner, 2020).

Au total, quand on tient compte des apports en AA au niveau de l'entièreté des régimes plutôt que des sources protéiques pris isolément, il n'apparaît pas de problèmes de couverture en AAI dans un régime dominé par les protéines végétales dans le cadre d'une alimentation diversifiée et d'un apport en protéines supérieur à 1 g/kg pc.j (Anses, 2007). Bien que l'apport en protéines diffère selon les profils végétariens (Greenwood *et al.*, 2000; Mariotti and Gardner, 2020), la plupart des végétariens et végétaliens ont un apport adéquat en protéines (Clarys *et al.*, 2014; Halkjær *et al.*, 2009; Mariotti and Gardner, 2020). Il n'y a pas de risque spécifique d'insuffisance d'apport en AAI dans les régimes végétariens (y compris concernant la lysine), à condition qu'une variété raisonnable d'aliments soit consommée et que les besoins énergétiques soient satisfaits (ce qui est globalement le cas dans les pays à hauts revenus) (Camilleri *et al.*, 2013; Mariotti and Gardner, 2020). Un apport insuffisant en protéines provenant d'un régime végétarien pourrait ainsi survenir si l'alimentation ne comprend pas d'aliments riches en protéines (par ex., légumineuses, noix, graines, et analogues végétaux d'aliments animaux).

En conclusion, les études sur les protéines dans les régimes végétalisés, par comparaison aux régimes encore classiques à dominante animale observés dans les pays occidentaux, devraient privilégier l'étude comparée de la qualité nutritionnelle globale des régimes (pas seulement l'adéquation protéique) et l'analyse des implications pour la santé à long terme des régimes selon les proportions des aliments riches en protéines végétales (Mariotti and Gardner, 2020).

c. Qualité nutritionnelle globale des régimes végétalisés

Comme déjà évoqué, l'évolution des apports en protéines végétales véhicule des controverses nutritionnelles, notamment en ce qui concerne le risque éventuel de déficience ou de carence avec des régimes qui seraient trop pauvres en protéines animales, puisque les produits animaux contribuent de manière importante à l'apport de nutriments indispensables dans les pays à hauts revenus (Phillips *et al.*, 2015). La littérature scientifique documentant les apports potentiellement inadéquats de certains nutriments dans différents types de régimes végétariens et en particulier chez les végétaliens est abondante (Allès *et al.*, 2017; Baudry *et al.*, 2016; Neufingerl and Eilander, 2022). La végétalisation peut être associée à un risque de sécurité nutritionnelle lorsqu'elle est mal conduite ou/et chez les personnes ayant récemment entamé une transition. La végétalisation accroît les risques d'apports déficients pour certains nutriments principalement apportés par les produits animaux dans les régimes actuels (vitamines B12 et A, DHA, fer, zinc, iode, calcium)(Bakaloudi *et al.*, 2021; Springmann, Wiebe, *et al.*, 2018). L'apport de vitamine B12 dans le régime alimentaire des humains est ainsi tributaire des aliments d'origine animale ou de compléments alimentaires issus de cultures bactériennes. Les viandes et abats apportent du fer, du zinc et du sélénium. Les produits laitiers sont riches en calcium (de 1,2 g/100 ml dans le lait à 10 g/100 g dans les fromages à pâte pressée cuite) et en iode. Les produits de la mer contribuent aux apports en iode et en EPA et DHA dans les régimes occidentaux (les poissons gras étant la principale source) (INRAE, 2020). Certaines sources de protéines végétales faisant partie pour la plupart de catégories alimentaires favorables à la santé (par ex. les noix) peuvent contribuer aux apports en DHA ou en iode. Cependant, au-delà d'un certain degré de végétalisation du régime, les problèmes nutritionnels sont donc principalement des apports insuffisants en vitamine B12 et EPA.

A l'inverse, nous avons mentionné que les produits végétaux sont associés à un " paquet protéique " spécifique, et ce, parce qu'ils contiennent précisément une quantité élevée de

fibres et d'autres nutriments indispensables tels que les vitamines B9, C et E, et les glucides complexes, ainsi que des composés phytochimiques à action physiologique (flavonoïdes, resveratrol, caroténoïdes, ou encore lycopène), et des quantités plus faibles de graisses saturées (Allès *et al.*, 2017; Mariotti *et al.*, 2021). Les protéines végétales en elles-mêmes pourraient affecter favorablement la santé cardio-métabolique par le biais de nombreux AA qui sont en quantités typiquement contrastées dans les produits végétaux par rapport aux produits animaux (Mariotti and Gardner, 2019). L'étude transversale menée par Allès *et al.* a permis de décrire les caractéristiques nutritionnelles associées aux régimes végétariens et végétaliens des adultes autodéclarés, en comparaison aux régimes omnivores, à partir de la vaste cohorte française NutriNet-Santé (2009-2015, $n = 93\ 823$). L'étude a mis en évidence que les régimes respectant le mieux l'adéquation nutritionnelle correspondaient aux régimes végétariens, l'adéquation nutritionnelle ayant été évaluée en calculant la prévalence de l'insuffisance d'apport en nutriment (proportion d'individus ayant un apport inférieur aux besoins moyens estimés au niveau de la sous-population). Les omnivores présentaient les insuffisances les plus élevées en folates (ou vitamine B9), en vitamine C (pour les hommes <55 ans et les femmes) et en vitamine E (pour les hommes et les femmes <55 ans). Les végétariens, comparés aux autres groupes de consommateurs, présentaient une prévalence plus élevée d'inadéquation pour la thiamine (ou vitamine B1, hommes et femmes), la niacine (ou vitamine B3, uniquement chez les hommes <65 ans), l'acide pantothénique (ou vitamine B5, proche de la prévalence chez les végétaliens) et la vitamine B6 (hommes <65 ans et femmes), le zinc (proche de la prévalence chez les végétaliens) et le potassium (pour les hommes et les femmes <55 ans). Enfin, les végétaliens présentaient la prévalence la plus élevée d'insuffisance d'apport en vitamine A, en riboflavine (ou vitamine B2, hommes et femmes <55 ans), et en vitamine B12 (pour tous les hommes, ainsi que pour les femmes <55 ans) (**Tableau 4**) (Allès *et al.*, 2017).

Nutrients	Men (n = 20,591)						Women (n = 73,191)					
	Vegetarians		Vegans ² n = 194	Meat-Eaters		Vegetarians		Vegans		Meat-Eaters		
	<65 Years n = 298	>65 Years n = 57		<65 Years n = 14,230	>65 Years n = 5853	<55 Years n = 1559	>55 Years n = 456	<55 Years n = 495	>55 Years n = 100	<55 Years n = 47,442	>55 Years n = 23,139	
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
Total vitamin A	10.1	9.3	18.4	12.4	6.6	6.0	1.2	10.4	6.5	5.8	1.2	
Thiamin	26.1	22.1	11.1	21.0	24.0	32.1	26.9	16.1	18.1	21.6	21.6	
Riboflavin	13.1	11.6	23.8	6.7	5.8	24.7	12.5	35.4	21.9	13.2	8.4	
Niacin	11.5	7.0	5.8	1.0	1.0	12.0	6.5	9.1	3.9	26.1	0.5	
Pantothenic acid	10.8	5.8	12.5	5.0	3.4	34.5	19.3	36.6	22.5	19.8	12.3	
Vitamin B6	23.2	15.7	11.7	18.9	16.1	37.0	23.3	19.8	19.3	27.2	18.4	
Folate	3.8	2.9	1.5	13.1	7.9	9.8	3.0	4.6	9.7	17.7	6.8	
Vitamin B12	32.8	16.8	69.9	0.8	0.6	45.3	30.9	83.4	49.8	3.7	1.4	
Vitamin C	26.9	34.0	18.3	38.8	32.9	41.0	29.4	26.5	24.1	45.7	36.7	
Vitamin E	10.2	11.5	1.8	24.0	27.9	28.9	23.0	8.9	26.1	41.6	38.2	
Calcium	13.0	43.3	38.2	13.0	49.0	28.1	56.7	60.8	73.9	66.4	64.1	
Iron	0.6	0.7	0.0	0.6	0.5	45.2	33.8	24.9	35.3	56.6	46.1	
Zinc	9.2	3.1	6.4	1.1	0.3	9.0	10.7	10.7	10.9	0.7	1.4	
Magnesium	45.8	49.1	21.9	71.5	69.8	59.7	43.4	36.8	45.3	79.2	68.1	
Phosphorus	0.4	0.0	0.5	0.0	0.0	1.4	0.5	5.1	0.6	0.0	0.0	
Potassium	12.4	10.8	8.4	10.6	6.0	36.5	17.0	24.1	17.3	32.7	17.7	

^{1,2} La probabilité d'apports en nutriments alimentaires inférieurs aux besoins moyens estimés pour la population française n'a pas pu être créée, étant donné qu'un seul participant végétalien avait plus de 65 ans.

Tableau 4. Prévalence de l'insuffisance d'apport¹ en nutriment chez les végétariens, les végétaliens et les omnivores, d'après les données de l'étude Nutrinet-Santé 2009-2015 (n = 93 823)

(extrait de Allès, 2017, Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Santé Study, p.11)

Une consommation accentuée de sources protéiques végétales serait donc pertinente sur le plan nutritionnel, mais implique une alimentation planifiée et/ou la prise de compléments alimentaires (**Figure 7**) (Agnoli *et al.*, 2017; Joulié, 2021). Dans certains cas, des changements dans la diversité du répertoire alimentaire, l'enrichissement en nutriments des aliments classiquement consommés, ou encore la supplémentation en nutriments seraient nécessaires pour obtenir des régimes alimentaires totalement sûrs sur le plan nutritionnel (Thorpe *et al.*, 2021).



Des analyses scientifiques doivent être menées pour conforter ces données.

Figure 7. Représentation d'une assiette végétalienne : portions recommandées pour une journée chez un adulte sain

(extrait de Joulié, 2021, Risques et bénéfices du végétarisme et du végétalisme, p.12)

d. Facteurs anti-nutritionnels et conséquences sur la biodisponibilité

La variabilité inter-individuelle de l'état nutritionnel est vaste, même chez des personnes ayant des habitudes alimentaires similaires. L'état nutritionnel d'un individu ne se limite pas à l'exposition alimentaire, mais est associé à de nombreux facteurs interactifs qui affectent et sont affectés par l'état nutritionnel, tels que les caractéristiques physiologiques, la corpulence et l'état de santé de l'individu, les niveaux de réserves corporelles en nutriments, ou encore la matrice alimentaire (Raiten *et al.*, 2021). En particulier, les aliments végétaux contiendraient davantage de facteurs anti-nutritionnels (par exemple, des inhibiteurs d'enzymes digestives, des tanins, des phytates) qui pourraient entraîner une biodisponibilité ou une digestibilité moindre (Agnoli *et al.*, 2017). Cependant, la digestibilité des aliments riches en facteurs anti-nutritionnels peut être améliorée après préparation (par ex. fermentation ou cuisson) (Sá *et al.*, 2020). A l'échelle du nutriment, la biodisponibilité est un terme qui désigne la proportion du nutriment ingéré qui est susceptible d'être disponible pour les besoins de l'organisme. La biodisponibilité dépend des étapes physiologiques permettant aux molécules exogènes (les nutriments en particulier) de parvenir à leur cible. Par exemple, les données de la littérature indiquent clairement que les phytates inhibent fortement l'absorption du fer non hémique et du zinc (Bel-Serrat *et al.*, 2014; Gibson *et al.*, 2018; Schlemmer *et al.*, 2009), de sorte que les personnes qui consomment des régimes riches en produits végétaux, à fortes teneurs en phytates, ont des besoins nutritionnels plus importants en fer et en zinc (Hallberg *et al.*, 1989; Miller *et al.*, 2007; Phillips *et al.*, 2015). Les produits végétaux sont les principaux contributeurs de phytates dans les régimes occidentaux (**Figure 8**) (Amirabdollahian, 2008). Dans plusieurs travaux de modélisation de régimes alimentaires végétalisés sous contraintes nutritionnelles, les auteurs ont pris en considération la biodisponibilité de certains nutriments, en utilisant des équations validées (fer, zinc), ou plus simplement en appliquant des taux de conversion de vitamines (conversion des caroténoïdes en vitamine A).

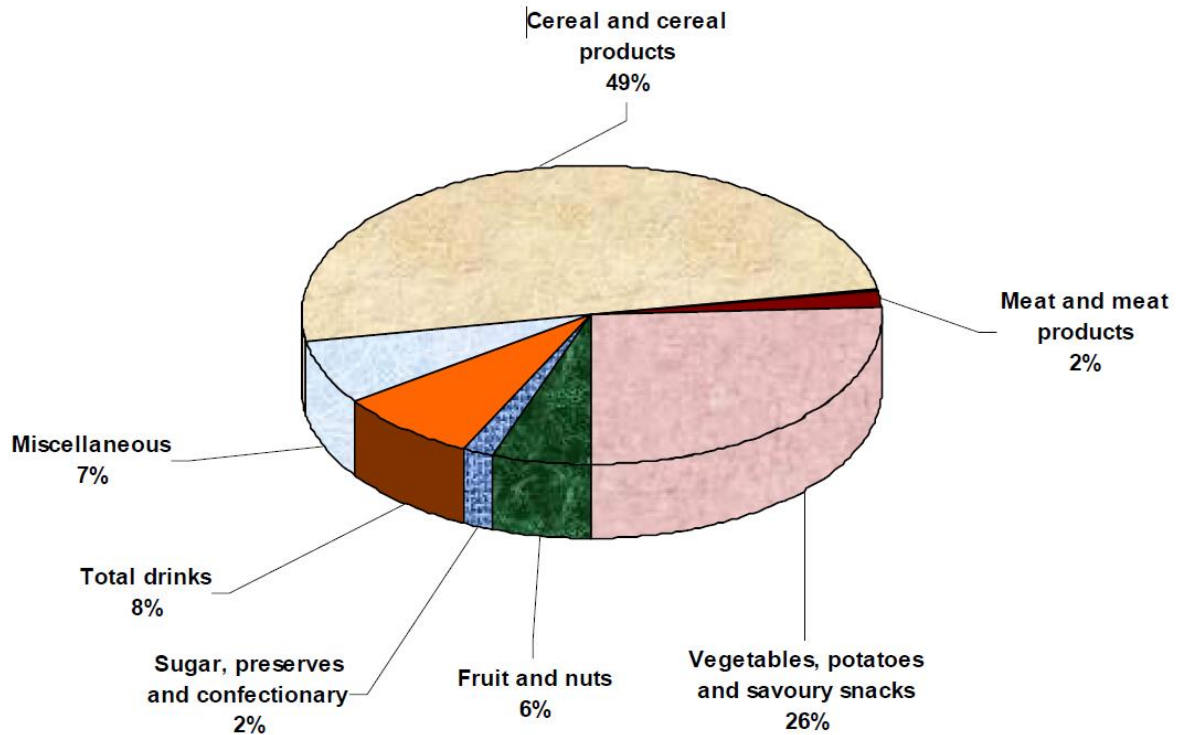


Figure 8. Contribution en pourcentage des types d'aliments à l'apport quotidien moyen en phytates des adultes âgés de 19 à 64 ans

(extrait du manuscrit de thèse du Dr. Amirabdollahian, 2008,
Zinc Adequacy in the UK Population, p.109)

L'absorption du zinc est dépendante de la quantité de phytates dans les régimes, comme modélisée par l'EFSA (EFSA, 2014), à partir de l'équation publiée initialement par Miller *et al.* (Miller *et al.*, 2007) :

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

où TAZ est le zinc absorbé (mmol), TDZ le zinc alimentaire (mmol) et TDP les phytates alimentaires (mmol). En 2013, Miller *et al.* ont révisé l'ancienne version de l'équation d'absorption du zinc (celle reprise par l'EFSA), afin de prendre en compte les effets du calcium alimentaire, des protéines et du fer sur l'absorption du zinc, en plus de l'effet des phytates (Miller *et al.*, 2013). Ces auteurs ont conclu que « le calcium et les protéines amélioreraient légèrement l'absorption du zinc, mais que le fer n'avait eu aucun effet statistiquement

significatif ». Ils ont également discuté la valeur ajoutée de l'équation publiée en 2013 en précisant que cette nouvelle prédiction de l'absorption du zinc était « modestement plus précise » par rapport au modèle zinc-phytates (de 2007). Dans un travail préliminaire nous avons testé l'impact de la mise à jour de l'équation de biodisponibilité du zinc sur les estimations de zinc biodisponible dans la population INCA3, et la mise à jour de l'équation de biodisponibilité du zinc a entraîné une légère augmentation du zinc biodisponible estimé chez les hommes (3,77 mg/j au lieu de 3,57 mg/j, soit +0,20 mg/j, soit +6%), et elle n'avait pas impact sur le zinc biodisponible estimé chez les femmes.

Concernant le fer, il se présente sous deux formes dans les aliments, le fer hémique (principalement présent dans la viande rouge) et le fer non hémique (présent dans d'autres aliments d'origine animale ou végétale) (Moretti, 2017a). L'équation suivante peut servir à modéliser l'absorption du fer hémique (Hallberg and Hulthén, 2000) :

$$\text{Log Absorption (\%)} = 1,9897 - 0,3092 \times \log(\text{FS})$$

où FS désigne la ferritine sérique. Pour le fer non hémique, l'équation suivante peut être utilisée (Armah *et al.*, 2013):

$$\text{Ln Absorption (\%)} = 6,294 - 0,709 \ln(\text{FS}) + 0,119 \ln(\text{C}) + 0,006 \ln(\text{MFP} + 0,1) - 0,055 \ln(\text{T} + 0,1) - 0,247 \ln(\text{P}) - 0,137 \ln(\text{Ca}) - 0,083 \ln(\text{NH})$$

où C est la vitamine C (mg), MFP est la consommation de viande, poisson et volaille (g), T est le thé (nombre de tasses), P sont les phytates (mg), Ca est le calcium (mg), et NH est le fer non hémique (mg). L'absorption du fer non-hémique est augmentée en cas de faible taux de FS et/ou de faibles apports en fer non-hémique (**Figure 9**) (Armah *et al.*, 2013). Elle augmente également avec les apports en vitamine C et en viande, poisson, volaille. Au contraire, l'absorption diminue avec la consommation de polyphénols (contenus dans le thé ou boissons équivalentes), de phytates et de calcium. Les phytates étant présents dans l'enveloppe ou le son des céréales et légumineuses, la consommation de ces aliments diminue donc l'absorption du fer (**Figure 9**) (Armah *et al.*, 2013).

La biodisponibilité du fer non hémique et, dans une moindre mesure, celle du fer hémique, varient en fonction du niveau des réserves en fer reflétées par la FS. Il est admis qu'un taux de FS de 15 µg/L chez l'adulte correspond à un manque de réserves en fer et que ces réserves augmentent de 8 mg pour chaque µg/L supplémentaire de FS (Walters *et al.*, 1973). Les

équations reliant la FS à la biodisponibilité du fer prévoient que, selon la proportion de fer héminique dans l'alimentation, la biodisponibilité du fer total est de 50 à 60% plus élevée pour une FS de 15 µg/L que pour une FS de 30 µg/L. En dehors de cet effet sur l'absorption intestinale, il n'y a pas de preuve d'un impact fonctionnel d'un manque de réserves en fer, comme l'indique un taux de FS de 15 µg/L, par rapport à un taux de FS de 30 µg/L (*WHO*, 2007). La valeur de 30 µg/L est utilisée par l'EFSA pour établir les valeurs de référence, et cette valeur correspond à des réserves en fer de l'ordre de 120 mg (*EFSA*, 2015). L'EFSA justifie le choix de cette valeur par le fait qu'elle est proche des concentrations médianes de FS chez les femmes préménopausées telles que rapportées dans plusieurs études de suivi de populations à l'échelle européenne.

En outre, pour tenir compte de la digestibilité chez l'Homme légèrement inférieure des protéines végétales par rapport aux protéines animales (*Mariotti*, 2017), certains auteurs appliquent une pénalité à l'apport en protéines provenant d'aliments contenant des protéines végétales pour modéliser la contrainte sur les besoins en protéines (*Barré et al.*, 2018; *De Gavelle et al.*, 2017). Dans l'étude de *Gavelle et al.*, ce coefficient de pénalité est de 5% (*De Gavelle et al.*, 2017).

L'estimation des besoins en vitamine A tient compte de la bioactivité des vitamères, et donc des conversions des caroténoïdes en rétinol (*Tanumihardjo*, 2002). La biodisponibilité du rétinol est considérée comme élevée. La cuisson peut entraîner des pertes de rétinol (sensible à l'oxygène et la chaleur), mais n'altère pas sa biodisponibilité avec la cuisson. La biodisponibilité du β-carotène peut varier selon la matrice alimentaire, mais cela est peu décrit dans la littérature. Par ailleurs, la biodisponibilité moyenne des caroténoïdes intervient dans une moindre mesure, par rapport aux biodisponibilités du fer non héminique et du zinc qui elles ont un impact notable sur les quantités absorbées.

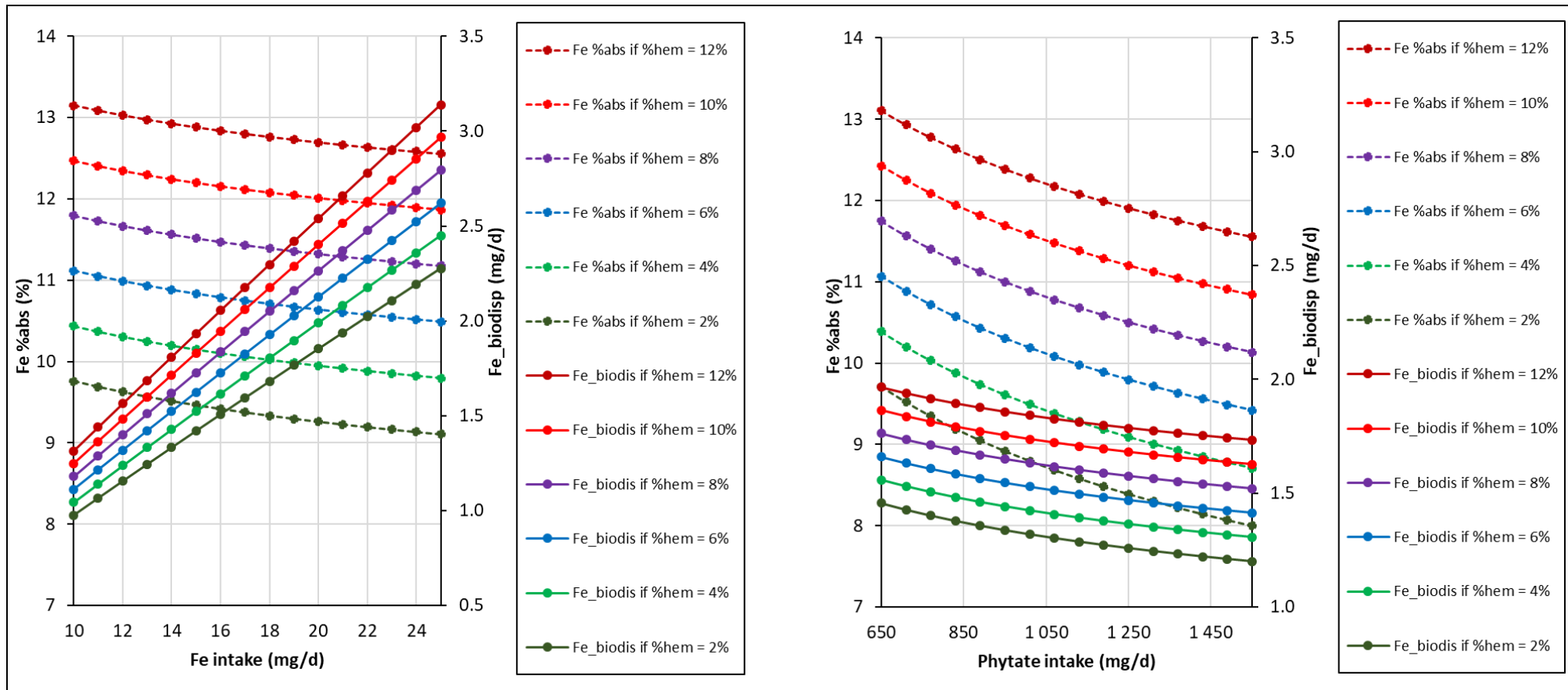


Figure 9. Taux d'absorption du fer et quantité de fer biodisponible en fonction de l'apport en fer (à gauche) ou de l'apport en phytates (à droite)

(d'après l'équation de Armah, 2013)

Conclusion partielle de la première partie

Nos choix alimentaires influencent notre état de santé. Il est désormais largement reconnu qu'une mauvaise alimentation correspond à un facteur de risque de décès et d'invalidité. Les maladies chroniques sont devenues la principale cause de décès dans le monde. L'épidémiologie nutritionnelle étudie les associations entre une consommation et la diminution ou l'augmentation de survenue d'une pathologie. La force des associations est appréciée par des estimations statistiques selon différents modèles. Les fruits, les légumes et les produits céréaliers complets (avec des teneurs élevées en fibres), et plus récemment le lait ou yaourt, les légumineuses, et les noix sont considérés comme des facteurs protecteurs vis-à-vis du risque de morbidité/mortalité prématurée, tandis que la viande rouge non transformée, la viande transformée et les boissons sucrées sont considérées comme des facteurs de risque. Aucune méta-analyse ne conclut sur l'existence d'une association entre consommation de viande blanche et mortalité prématurée. Outre les études épidémiologiques étiologiques, de nombreux autres modèles d'évaluation comparative des risques sont basés sur la simulation et combinent des techniques de modélisation, et de stochastique pour décrire et analyser les liens entre le régime alimentaire, la nutrition et la prévention des maladies liées à l'alimentation, et peuvent être utilisés pour quantifier les changements positifs ou négatifs du risque lié à la santé à long terme qui résulteraient de modifications du régime alimentaire moyen d'un individu ou d'une population. A l'échelle des régimes, les revues systématiques de la littérature scientifique et les méta-analyses tendent à conclure globalement que les régimes végétalisés sont associés à un risque moindre de maladies chroniques, alors que les régimes riches en viandes rouge et transformée sont associés à une augmentation du risque de mortalité prématurée. Cependant, les régimes occidentaux classiques, qui reposent davantage sur des sources animales, ont tendance à favoriser un meilleur statut nutritionnel en ce qui concerne le fer, le zinc, la vitamine B12, le calcium, l'iode et certains acides gras. Un rééquilibrage accentué au profit des sources protéiques végétales implique donc une alimentation bien planifiée. Sur le plan nutritionnel, il n'y aurait pas de problèmes de couverture en AAI dans un régime dominé par les protéines végétales dans le cadre d'une alimentation diversifiée et d'un apport en protéines suffisant. Les viandes contiennent de nombreux nutriments d'intérêt pour la qualité nutritionnelle des régimes, parmi lesquels le fer hémique, le zinc, le sélénium, ainsi que plusieurs vitamines (notamment, A, B2, B6, B12). De fait, si une consommation excessive de viande est déconseillée, une consommation raisonnable s'avère au contraire favorable à la couverture des références nutritionnelles. Enfin, la carence en fer se produit lorsque les réserves en fer sont épuisées et conduit à une anémie ferriprive si les stocks ne sont pas reconstitués.

II. Transition « proflexitarienne » de l'alimentation

L'état de l'art documente que les systèmes alimentaires actuels ne sont pas durables (Masson-Delmotte *et al.*, 2018), et les niveaux excessifs de consommation de viande dans les pays à hauts revenus font partie du problème. Les régimes occidentaux contribuent largement à la charge de morbidité. A l'horizon 2050, se profilent des régimes alimentaires avec peu ou pas de viande, qui devraient offrir des profils globaux plus sains, pour la santé humaine et planétaire (Coleman *et al.*, 2021; WHO, FAO, 2019; WHO, 2018). Notre pays est entré dans une phase de transition alimentaire caractérisée par une diminution de la consommation de produits animaux, et particulièrement de viande rouge, au profit de sources protéiques végétales, avec notamment un essor récent du « flexitarisme ».

II.1. Evolutions récentes des consommations de viande en France et dans d'autres pays à hauts revenus

a. Niveaux actuels de consommation de viande et tendances pour les années à venir

Comme pour la plupart des autres aliments, il n'est pas aisé de mesurer la consommation de viande. Différentes méthodes et approches sont utilisées pour fournir une mesure de la consommation, ce qui explique pourquoi des valeurs différentes peuvent être observées selon les sources (Kanerva, 2013). Les enquêtes sur la consommation, telles que les registres de régime et les rappels de 24 heures, reflètent les niveaux de consommation réels. Ces enquêtes reposent classiquement sur des échantillons de population constitués de volontaires autosélectionnés. Les méthodes basées sur des « bilans alimentaires » quant à elles n'évaluent pas directement la consommation réelle, mais présentent une mesure de la disponibilité pour la consommation, calculée comme la différence entre la production, les importations et les exportations au sein d'un pays.

En France, la consommation de viande, calculée par bilans, avait augmenté continuellement depuis l'après-guerre jusqu'en 1998, où un pic avait été atteint avec 94 kg en équivalent carcasse de viandes consommées par habitant et par an (kgec/hab.). Depuis une trentaine d'années, la consommation de produits carnés est globalement sur une tendance décroissante (-16% entre 1992 et 2018), avec une stabilisation depuis 2014 (Agreste, 2020). Après exclusion des déclarations potentiellement erronées, l'échantillon de la population

générale extraite de l'étude INCA3 conduite en 2014-2015 ($n = 2\ 055$) renseigne sur la consommation moyenne en viande telle que déclarée pour « l'ensemble de la viande ». Celle-ci a été estimée à 83 g/j (de Gavelle, Davidenko, *et al.*, 2019), cette donnée étant en cohérence avec d'autres sources relatives à l'approvisionnement en viande (*FranceAgriMer*, 2021; *Our World in Data*, 2017). D'après la base NutriNet, qui est moins représentative des habitudes de consommation de la population générale française que la base INCA3 mais qui dispose d'un grand nombre de consommateurs (50 000) couvrant des profils de consommation plus variés, les consommations de viande fraîche et de viande transformée auraient diminué respectivement de 5,09 g/jour (écart-type : 51,15) et de 1,12 g/jour (26,05) entre 2014 et 2018 (Brunin *et al.*, 2022). En 2020, la consommation apparente de viande, calculée par bilan, a réduit globalement de -1,5% sur un an et de -1,7% en moyenne par habitant. Cependant, ce net repli s'est inscrit dans le contexte particulier de la crise sanitaire, et serait la conséquence des confinements et de la fermeture d'une grande partie de la restauration hors foyer (*FranceAgriMer*, 2021).

En Europe, les apports moyens en viande totale varient de 75 à 233 g/j chez les adultes, selon les estimations de Cocking *et al.* (Cocking *et al.*, 2020). Le **Tableau 5** présente les niveaux actuels de viande disponible à la consommation en France, en Allemagne et au Royaume-Uni, sur la base des données de la FAO (FAOSTAT, 2018; *EPHA*, 2021). Selon les estimations de la Direction Générale chargée des politiques de la Commission européenne concernant l'agriculture, le développement rural et la politique agricole commune (DG AGRI), la consommation de viande dans l'ensemble de l'Union Européenne devrait légèrement diminuer, passant d'une moyenne de 69,8 kg par habitant à 68,7 kg, soit une baisse de -1,6% entre 2020 et 2030 (*European Commission*, 2019).

Enfin, la tendance à la baisse ne concerne que les pays à hauts revenus ayant entamé une seconde transition alimentaire. Au niveau mondial, la demande en viande est globalement en hausse (Henchion *et al.*, 2021; Nungesser and Winter, 2021; *FAO*, 2017). Selon les estimations de la fondation Heinrich Böll, un Américain mange environ 100 kilos de viande par an, un Chinois 60, un Suisse 51 et un Africain 17 (Heinrich Böll Stiftung, 2021). La consommation globale de viande devrait augmenter de 1 kg par personne entre 2019 et 2030, pour atteindre 35,7 kg par habitant, soit 374 millions de tonnes au total (OECD and FAO, 2020).

	Volaille	Viande rouge (bœuf, porc, mouton)	Autres viandes	Total
France	22,99	54,88	1,11	78,98
Allemagne	18,15	53,2	1,79	73,14
Royaume-Uni	30,21	46,17	0,87	77,25

Tableau 5. Viande disponible à la consommation par kg/par habitant pour la France, l'Allemagne, et le Royaume-Uni en 2018
(traduit de European Public Health Alliance (EPHA), 2021, Meat Production & Consumption (in Europe) and Public Health, p.13)

b. Quelques évolutions opposées selon le type de viande, avec notamment une croissance de la consommation de la volaille au détriment du boeuf

La consommation de viande est au cœur de nombreux débats, avec une tendance générale à la réduction semblant s'imposer dans l'opinion publique au sein des pays à hauts revenus. En France, dans un contexte de stagnation de la consommation globale de viande sur la dernière décennie, les statistiques de consommation rendent compte de quelques évolutions opposées selon le type de viande, avec notamment une croissance de la consommation de la volaille au détriment du bœuf. En France, les parts des viandes bovine, ovine et porcine dans la consommation totale de viandes se sont réduites en 20 ans depuis 1998 au profit de la viande de volaille (**Figure 10**) (*FranceAgriMer, 2020; FranceAgriMer, 2021*). La volaille est désormais la seconde viande la plus consommée en France, dépassant en volume la viande bovine depuis 2013. D'après l'enquête conduite par FranceAgriMer en 2020, la volaille était le type de viande le plus conservé par les flexitariens (43% la conservaient et 48% la limitaient) (*FranceAgrimer / IFOP, 2021*). La viande de porc (viande fraîche et charcuterie) reste la viande la plus consommée en France, malgré son recul constaté depuis presque 20 ans (baisse de 13% de la consommation individuelle de porc entre 2000 et 2020). En 2020, la consommation française de viande de boucherie (bœuf, porc, agneau) a été réduite de -2,1%. La consommation de volaille résiste (-0,3%), avec un maintien de la consommation de poulet et de dinde, et une baisse de la consommation de canard à cause du contexte sanitaire (*FranceAgriMer, 2021*).

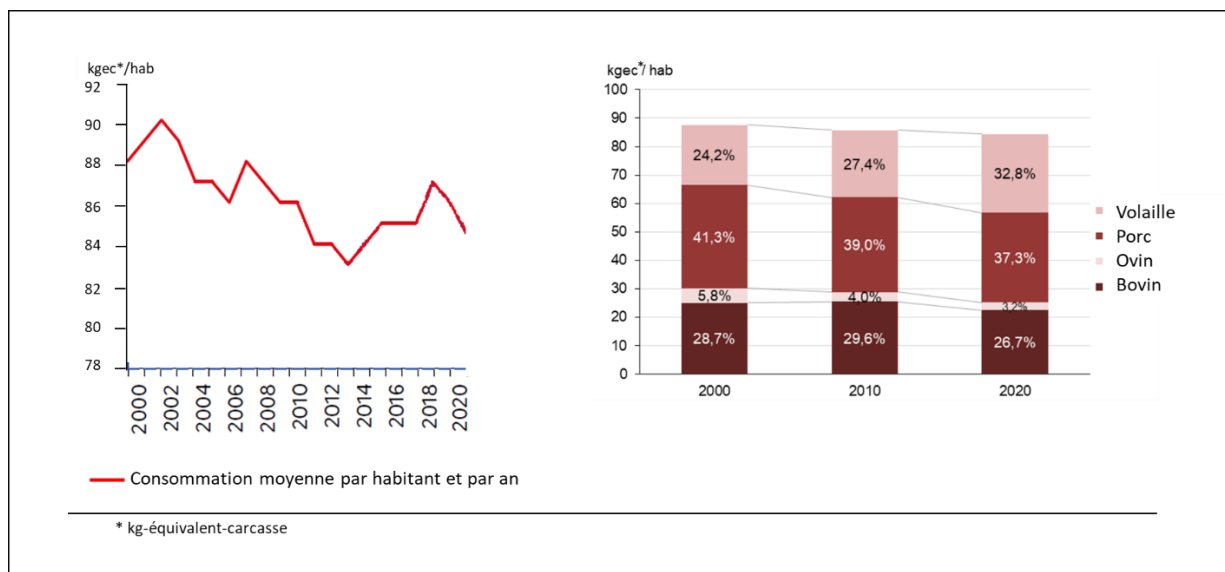


Figure 10. Consommation française de viande entre 2000 et 2020

(d'après FranceAgriMer, 2020 et 2021)

En Europe, les projections de la DG Agri relatives à la consommation de viande à l'horizon 2030 font apparaître une baisse avec des déplacements entre les différents types de viande. La consommation de viande de bœuf et de porc (viandes rouges) en particulier devrait diminuer en Europe, tandis que la consommation de volaille (viande blanche) augmentera probablement (*European Commission, 2019*).

Au niveau mondial, la plus grande part de la consommation de viande supplémentaire par habitant sera également attribuable à une augmentation spécifique de la consommation de volaille, alors que la consommation globale de toutes les viandes est appelée à augmenter. La volaille devrait représenter 50% de la viande supplémentaire consommée (*OECD and FAO, 2020*).

II.2. Le « flexitarisme », un profil de consommation émergent

a. Définition et caractéristiques

Les régimes végétariens peuvent être définis comme l'exclusion partielle des produits d'origine animale, avec l'exclusion systématique de la viande rouge et de la volaille, et de certains autres produits animaux comme le poisson, les œufs et/ou les produits laitiers, selon le type de végétarisme (*Dagnelie and Mariotti, 2017; Moretti, 2017b; Niva et al., 2017; Winnie Gerbens-Leenes, 2017*), tandis que le régime végétalien implique l'exclusion totale des

produits animaux (y compris tous les produits d'origine animale tels que les graisses ajoutées) (Dagnelie and Mariotti, 2017). Le style de vie végétal désigne les individus qui suivent un régime végétalien et évitent aussi les produits animaux (cuir, laine, soie, ...) pour se vêtir ou pour tout autre usage (FranceAgriMer, 2019). Les régimes flexitariens ou semi-végétariens sont caractérisés par un comportement alimentaire particulier d'éviction partielle et consciente des viandes (WHO, 2021b; Derbyshire, 2017). La tendance flexitarienne consiste en une consommation variable et réduite en viandes et en produits carnés sans les exclure totalement (portions de viande réduites ou davantage de repas sans viande). Comparé au végétarisme, le flexitarisme répond à des logiques légèrement différentes, notamment celle de santé et/ou s'inscrivant dans la tendance à « consommer moins mais mieux » (FranceAgriMer, 2019). Le terme « flexitarisme » est actuellement une définition émanant de la sociologie. On note l'absence d'analyse permettant de le délimiter et d'y associer des indicateurs chiffrés. Il n'existe encore aucune définition officielle du flexitarisme, les personnes déclarant ce régime peuvent donc en avoir des interprétations assez variées selon leur situation personnelle (limitation de tous les types de viande et/ou faible consommation de viande et/ou limitation d'un seul type de viande (le bœuf notamment)). D'après une enquête conduite par FranceAgriMer en 2020 sur un échantillon représentatif des adultes français âgés de 15 à 70 ans ($n = 15\ 001$), les flexitariens « marqués » se distinguent comme ceux qui consomment de la viande 1 fois par semaine ou moins (FranceAgrimer / IFOP, 2021). Manger moins de viande est de plus en plus considéré comme une option plus saine et plus éthique. C'est pourquoi un nombre croissant de consommateurs flexitariens ou pro-flexitariens (c'est-à-dire projetant de réduire leur consommation dans un avenir proche) recherchent des substituts de viande d'origine végétale ou analogues végétaux pour remplacer au moins une partie de la viande animale qu'ils consomment (Choudhury *et al.*, 2020; Schösler *et al.*, 2012). D'après l'enquête conduite par FranceAgriMer, 67% des flexitariens vont citer les « légumes secs » parmi les produits de substitution (contre 73% des personnes ayant un régime sans viande) (FranceAgrimer / IFOP, 2021).

En termes de profils de consommateurs, les flexitariens ne sont pas nécessairement un groupe unifié mais constituent plutôt différents groupes selon les niveaux de rigueur et d'adhésion à la restriction de la viande. Le **Tableau 6** donne une vue d'ensemble de la recherche

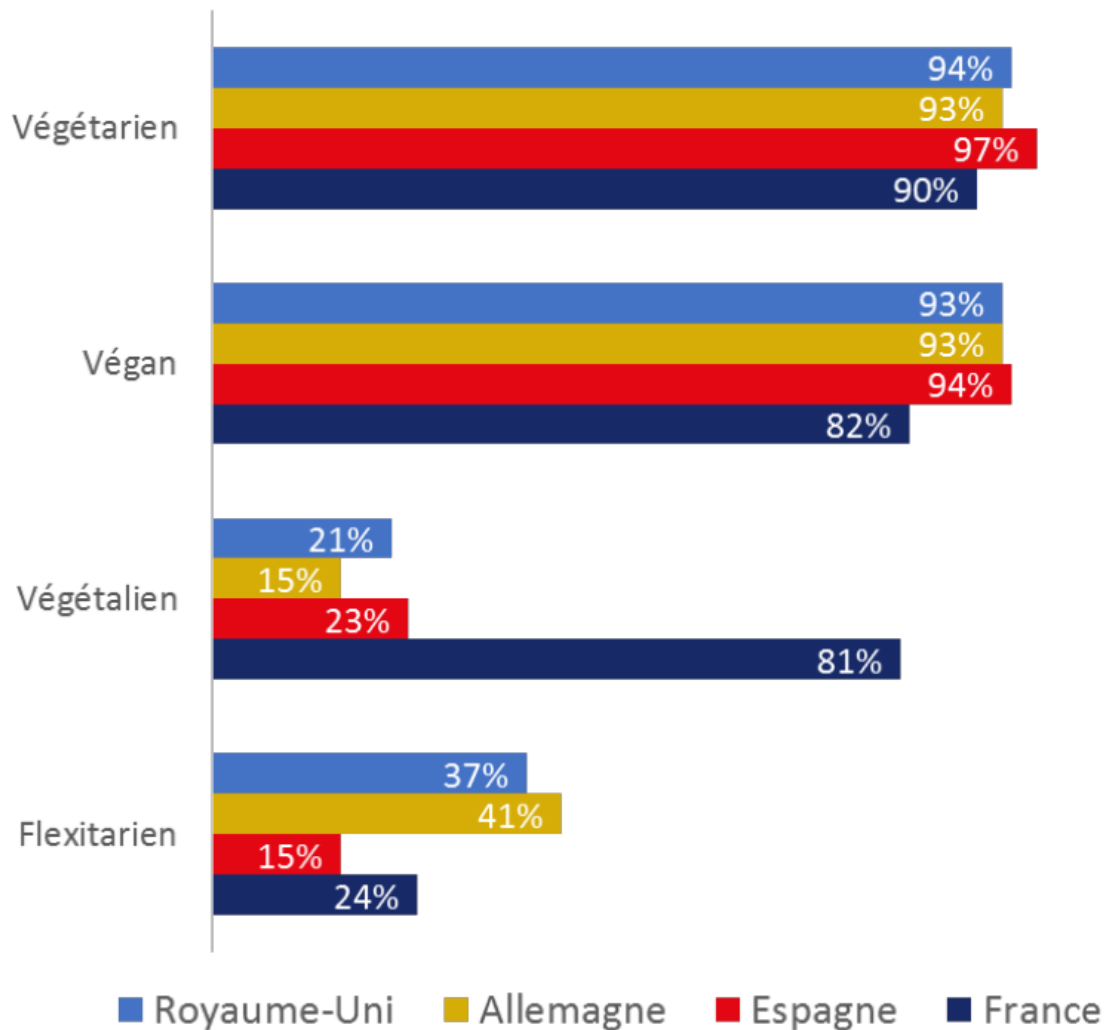
exploratoire menée par Dagenos *et al.* sur les définitions et caractéristiques des flexitariens telles que décrites dans la littérature récente (Dagevos, 2021).

Publication scientifique	Définition/Éléments de classification
Australie	
Marinova and Bogueva (2019)	Intentions de réduire sa consommation de viande ou d'exclure complètement la viande.
Malek et al. (2019b)	Volonté auto-déclarée de réduire sa consommation de viande ou de la réduire davantage.
Malek and Umberger (2021)	Avoir un plat de viande trois jours par semaine au maximum
Malek & Umberger (2021)	Fréquence auto-déclarée de consommation de viande; types de viandes consommés; volonté de réduire davantage sa consommation de viande.
Estell et al. (2021)	Les participants ont répondu à une brève description des types de régimes alimentaires et ont été invités à indiquer quel terme décrit le mieux leur régime actuel.
USA	
Neff et al. (2018)	Les participants se sont décrits comme ayant réduit leur consommation de viande, en particulier de viande rouge et de viande transformée, par rapport aux années précédentes.
Canada	
Lacroix and Gifford (2019)	Les participants avaient déjà fait des efforts conscients pour réduire leur consommation de viande, et sont motivés pour passer à un régime alimentaire moins riches en viande.
Lacroix and Gifford (2020)	Segmentation sur 19 variables de profilage, parmi lesquelles la dépendance à la viande, l'appréciation du goût de la viande, le conformisme, la néophobie alimentaire, etc.
Nouvelle-Zélande	
Lentz et al. (2018)	Typologie de profils de consommations alimentaires sur la base d'une large enquête
Danemark	
Reipurth et al. (2019)	Participants caractérisés par une attitude positive à l'égard d'un régime végétalisés.
Hielkema and Lund (2021)	Distinction des étapes du changement de comportement alimentaire vers une réduction de viande, sur la base des aliments consommés dans les principaux repas, par semaine.
Portugal	
Possid'onio et al. (2021)	Profils d'attachement à la viande; plus/moins enthousiaste à l'idée de manger de la viande (rouge); plus/moins enclin aux analogues végétaux.
Suisse	
Wozniak et al. (2020)	Les participants ont été classés sur la base des résultats d'un questionnaire sur la fréquence des repas sans viande, ou selon d'autres caractéristiques alimentaires.
Weibel et al. (2019)	Fréquence de la consommation de viande déclarée par l'individu, et accord sur le fait qu'il est normal de consommer peu ou pas de viande.
Hagmann et al. (2019)	Soutien autodéclaré à l'intention de consommer peu ou pas de viande.
Allemagne	
Koch et al. (2019)	La consommation maximale de viande officiellement recommandée par les directives diététiques nationales est prise comme critère pour faire la distinction entre les personnes qui mangent peu de viande (en-dessous du maximum) et celles qui en mangent beaucoup (au-delà du maximum).
Biermann and Rau (2020)	L'auto-classification des participants dans l'un des cinq groupes alimentaires présentés (végétaliens, végétariens non végétaliens, pescetariens, flexitariens, et omnivores).
Michel et al. (2021)	L'auto-identification des participants comme flexitariens.
Allemagne, UK, France	
Michel, Knaapila, Hartmann, & Siegrist (2021)	Réponse des participants à une brève explication du style de régime qui, selon eux, décrit le mieux leur mode d'alimentation actuel.
France	
De Gavelle et al. (2019)	Niveau de modération de la viande rouge et de la viande transformée, et stade de la volonté de réduire la consommation de viande et de suivre un régime moins animal et plus végétal.
Belgique	
De Backer and Hudders (2014)	Fréquence de consommation hebdomadaire de viande autodéclarée.
De Backer and Hudders (2015)	Fréquence de consommation hebdomadaire de viande autodéclarée.
Pays-Bas	
Dagevos and Voordouw (2013)	Fréquence de consommation hebdomadaire de viande autodéclarée.
Verain et al. (2015)	Typologie de profils de consommations alimentaires sur la base d'une enquête.
Verain, Dagevos, & Jaspers (2022)	Identification de différents segments flexitariens par le biais de diverses données socio-psychologiques liées à la viande

Tableau 6. Définition et caractéristiques associées au flexitarisme dans 25 récentes études

(traduit et adapté de Dagevos, 2021, Finding flexitarians: Current studies on meat eaters and meat reducers, Trends in Food Science & Technology 114 (2021) 530–539, p.536)

Les profils des consommateurs flexitariens s'apparentent aux profils des végétariens sous certains aspects, mais nécessite des enquêtes complémentaires pour mieux les caractériser (âge, sexe, statut socio-économique) (Stewart *et al.*, 2021). D'après une enquête quantitative conduite par FranceAgriMer en 2018 et réalisée *via* Internet sur des échantillons représentatifs de la population adulte ($n = 1\ 486$) de quatre pays européens (France, Allemagne, Royaume-Uni, Espagne), les individus suivant un profil végétarien représentaient une part importante de la population étudiée (**Figure 11**) (FranceAgriMer, 2019), et seraient majoritairement des femmes, des individus jeunes (moins de 35 ans), ainsi que des populations urbaines ou dotées d'un fort capital culturel (cadres ou agents très diplômés, selon le pays) (FranceAgriMer, 2019). D'après l'enquête conduite par FranceAgriMer en 2020, les flexitariens seraient également plus fréquents parmi les jeunes générations et les catégories socio-professionnelles aisées (FranceAgrimer / IFOP, 2021).



Les pourcentages représentent les proportions d'individus ayant déjà entendu les termes suivants « végétarien », « vegan », « végétalien » ou « flexitarien », sur la base des échantillons représentatifs des populations adultes ($n = 1\ 486$) de quatre pays européens (France, Allemagne, Royaume-Uni, Espagne). Si les termes « végétarien » et « végan » sont bien connus, le terme « flexitarien » l'est nettement moins.

Figure 11. Part des personnes ayant déjà entendu les termes caractérisant les différents types de régimes végétalisés

(d'après FranceAgriMer, 2019, Combien de végétariens en Europe ?, p.13)

b. Part des flexitariens en France et dans d'autres pays à hauts revenus

Malgré la variété des définitions, il apparaît que globalement le nombre de flexitariens et proflexitariens a fortement augmenté ces toutes dernières années dans les pays à hauts revenus, tandis que le nombre de végétariens et végétaliens n'augmente pas.

Dans une enquête menée en 2018 sur un échantillon représentatif de la population française, les « flexitariens » étaient définis par les individus ayant déclaré « limiter au minimum leur consommation de viande » et non classés comme « végétariens ». En 2018, les flexitariens représentaient 14% de la population française. Les « pro-flexitariens » étaient ceux qui répondaient favorablement à la question « J'envisage de ne manger de la viande et du poisson que très rarement (pas plus d'une fois par semaine) » et non classés « flexitariens », ni « végétariens ». Ils représentaient 18% de la population (de Gavelle, Davidenko, *et al.*, 2019). Dans un sondage de 2015, 23% des sondés déclaraient avoir réduit leur consommation de viande par rapport à l'an passé, puis 50% en 2018. En 2019, le taux de flexitariens, définis comme les individus ayant indiqué « *diminuer volontairement leur consommation de viande, sans être exclusivement végétarien* » était de 20%, puis de 24% en 2020, d'après l'enquête FranceAgriMer sur les évolutions des profils de consommation, tandis que le taux de végétariens demeurait à 2-3% en 2020. D'après l'enquête, 68% des sondés étaient d'avis en 2020 qu' « *en France, on consomme trop de viande* » (FranceAgrimer / IFOP, 2021). Quelques études ont proposé une segmentation des populations flexitariennes en plusieurs sous-groupes. D'après la revue de Dagevos évoqué dans le paragraphe précédent, un nombre croissant de consommateurs adoptent un régime alimentaire flexitarien (**Tableau 7**) (Dagevos, 2021). A partir d'une enquête en ligne menée auprès de 717 flexitariens australiens, Kwasny et al. ont décrit les caractéristiques des consommateurs qui se décrivent comme flexitariens et ont analysé les variations dans la fréquence de leurs consommations de viande (bœuf, poulet, porc, agneau) et de poisson. Les auteurs ont également identifié cinq segments flexitariens distincts, en décrivant les variations de comportement alimentaire selon des facteurs tels que la motivation des individus à suivre un régime flexitarien par exemple. Dans ces cinq segments, les différences de fréquence de consommation de viande ont révélé trois niveaux distincts de restriction de la consommation de viande : « gros réducteurs de viande » (14% de l'échantillon), « réducteurs de viande modérés » (36%) et « réducteurs de viande légers » (50%) (Kwasny *et al.*, 2021).

Publication scientifique	Part des flexitariens, % de l'échantillon (Taille de l'échantillon, n)
Australie	
Marinova and Bogueva (2019)	12% (380)
Malek et al. (2019b)	22%(287)
Malek and Umberger (2021)	20% (2 797)
Malek & Umberger (2021)	13% (réduction de viande élevée, 717); 36% (réduction de viande modérée, 717); 50%(réduction de viande faible, 717)
Estell et al. (2021)	19% (660)
USA	
Neff et al. (2018)	66% (1 112)
Canada	
Lacroix and Gifford (2019)	14% (355)
Lacroix and Gifford (2020)	11% (377)
Nouvelle-Zélande	
Lentz et al. (2018)	37% (841)
Danemark	
Reipurth et al. (2019)	48% (462)
Hielkema and Lund (2021)	13% (réduction de viande en cours, 1 005); 14% (réduction de viande déjà effectuée, 1 005)
Portugal	
Possid'onio et al. (2021)	26% (129)
Suisse	
Wozniak et al. (2020)	16% (10 797)
Weibel et al. (2019)	41% (1 818)
Hagmann et al. (2019)	31% (4 213)
Allemagne	
Koch et al. (2019)	42% (12 733)
Biermann and Rau (2020)	21% (420)
Michel et al. (2021)	20% (1 039)
Allemagne, UK, France	
Michel, Knaapila, Hartmann, & Siegrist (2021)	25% (Allemagne, 567); 11% (UK, 562); 16% (France, 605)
France	
De Gavelle et al. (2019)	6% (flexitarien, 2 055); 18% (pro-flexitarien, 2 055)
Belgique	
De Backer and Hudders (2014)	42% (semi-flexitarien, 1 556); 48% (semi-flexitarien léger, 1 556)
De Backer and Hudders (2015)	28% (299)
Pays-Bas	
Dagevos and Voordouw (2013)	15% (flexitariens avancés, 1 253); 29% (flexitariens intermédiaires, 1 253); 36% (flexitariens légers, 1 253)
Verain et al. (2015)	20% (flexitariens conscients, 1 253); 10% (flexitariens potentiels, 1 253); 39% (flexitariens inconscients, 1 253)
Verain, Dagevos, & Jaspers (2022)	10% (flexitariens avancés, 19 791 935); 30% (flexitariens intermédiaires, 19 791 935); 41% (flexitariens léger, 19 791 935) 14% (flexitariens conscients, 19 791 935); 18% (flexitariens potentiels, 19 791 935); 40% (flexitariens inconscients, 19 791 935)

Tableau 7. Part des flexitariens dans les 25 études mentionnées dans le tableau 6

(traduit et adapté de Dagevos, 2021, Finding flexitarians: Current studies on meat eaters and meat reducers, Trends in Food Science & Technology 114 (2021) 530–539, p.536)

c. Motivations et contraintes à l'adoption d'un régime flexitarien

Dans les sociétés occidentales, les questions liées à la viande font de plus en plus l'objet de débats publics (Nungesser and Winter, 2021). L'enquête conduite par FranceAgriMer en 2018 et relative aux quatre pays européens (France, Allemagne, Royaume-Uni, Espagne) montre que les logiques de la non-consommation de viande, ou de sa réduction, variaient selon le pays européen, et seraient multifactorielles (FranceAgriMer, 2019). La santé représenterait une motivation importante chez les flexitariens, mais pas la seule. Une étude récente menée en Espagne sur un échantillon de 101 consommateurs (parmi lesquels 24 flexitariens et 27 végétariens/vegétaliens) a rapporté que les consommateurs qui réduisent ou évitent la viande accordent plus d'attention à la qualité de leur alimentation et à leur santé, et ils se préoccupent également davantage du bien-être animal et des enjeux environnementaux liés à leur alimentation (Noguerol *et al.*, 2021). La plupart des études et enquêtes qui explorent la perception de différents consommateurs envers les produits carnés visent à mieux comprendre leurs motivations et leurs attitudes.

D'après l'étude conduite par FranceAgriMer en 2018, la santé était la raison la plus citée par les flexitariens (53% des répondants des 4 pays) (FranceAgriMer, 2019). Dans l'étude de Kwasny *et al.* ayant porté sur une population flexitarienne australienne ($n = 717$), la santé était le facteur le plus couramment cité comme moteur de la décision d'adopter un régime flexitarien (Kwasny *et al.*, 2021). Cependant, d'après l'enquête conduite par FranceAgriMer en 2020 sur la population générale ($n = 15\ 001$), 79% des adultes français âgés de 15 à 70 ans pensaient que manger de la viande est nécessaire pour leur santé (FranceAgrimer / IFOP, 2021).

Engelmann *et al.* ont évalué les connaissances générales en matière de nutrition de deux groupes de participants (50 individus suivant un régime omnivore vs. 51 flexitariens, végétariens ou végétaliens) à partir d'un questionnaire sur les connaissances générales en matière de nutrition (GNKQ) décrit en 1999 dans l'article publié par Parmenter and Wardle

(Parmenter and Wardle, 1999). Les deux groupes présentaient, en général, des connaissances similaires sur la nutrition, puisqu'il n'y avait pas de différences significatives entre eux dans aucune section du questionnaire ($p > 0,05$) (Engelmann *et al.*, 2021).

Les considérations éthiques, notamment le bien-être animal, marquent également le changement d'attitudes à l'égard de la viande surtout chez les jeunes générations. Dans l'étude de Kwasny *et al.*, les consommateurs d'un petit segment de la population rassemblant les " gros réducteurs de viande " étaient à la fois sensibles aux problématiques de bien-être animal, et les plus susceptibles d'adopter des régimes végétariens ou végétaliens à l'avenir (Kwasny *et al.*, 2021). Dans l'étude FranceAgriMer de 2018, un flexitarien déclaré sur deux évoquait les conditions d'élevage parmi les raisons qui le poussent à consommer peu de viande, et les personnes qui ont entendu parler de débats sur les conditions d'élevage étaient plus nombreuses à se déclarer flexitariennes (25% vs. 16% de ceux qui n'en ont pas entendu parler) (FranceAgriMer, 2019). Plus récemment, en 2020, 40% des répondants évitaient la viande en raison des conditions d'élevage (FranceAgrimer / IFOP, 2021).

L'environnement est un critère encore rarement déterminant (cité par moins d'un tiers des sondés en 2018) (FranceAgriMer, 2019). Cependant, en France par exemple, il existe des sous-populations déjà sensibilisées aux problématiques environnementales, puisque l'environnement est la seconde raison la plus citée après la santé dans l'enquête NutriNet (Hercberg *et al.*, 2010).

A noter également qu'en 2018, 28% des flexitariens citaient les considérations financières au sens large (prix et volonté de faire des économies) parmi leurs motifs de limiter la consommation de viande, et les motivations économiques à la réduction de la consommation de viande étaient citées chez tous les profils de consommateurs flexitariens (FranceAgriMer, 2019).

L'étude des déterminants a notamment pour enjeu d'anticiper la progression du phénomène dans la population pour analyser comment les consommateurs sont guidés vers des régimes alimentaires durables (de Boer and Aiking, 2021; Eckl *et al.*, 2021), et pour évaluer les répercussions de ces transitions alimentaires sur les filières agricoles (FranceAgrimer / IFOP, 2021). Une revue narrative, reposant sur une recherche systématique incluant 23 études au

final, visait à identifier les freins et leviers, qui sous-tendent le remplacement de la viande par des sources protéiques végétales chez les populations omnivores ou flexitariens dans les pays à hauts revenus. D'après cette revue, les facteurs pouvant inhiber ces changements de comportement étaient entre autres l'attachement à la viande, la néophobie alimentaire, le caractère moins approprié à la situation de consommer des alternatives végétales, ou encore le sexe masculin. A contrario, les facteurs listés comme des leviers étaient les niveaux d'information sur la santé et l'environnement, un prix souvent plus bas des produits végétaux, ou encore le sexe féminin (Eckl *et al.*, 2021). A partir d'une enquête et des discussions de groupe incluant 24 participants flexitariens néerlandais, Sijtsema *et al.* ont exploré les capacités et les opportunités peu étudiées chez les flexitariens de consommer moins de viande et plus d'analogues végétaux ou simili carnés. Les auteurs concluent que les flexitariens rencontrent encore des obstacles dans les transitions vers une consommation moindre de viande dans la vie quotidienne, tant dans les contextes sociaux et physiques (opportunité) que dans les connaissances nutritionnelles, les compétences culinaires, l'inspiration ou les recettes (capacité) (Sijtsema *et al.*, 2021)

Conclusion partielle de la seconde partie

Notre pays, comme tous les pays économiquement développés, entre dans une phase de transition alimentaire caractérisée par une diminution de la consommation de produits animaux, et notamment de viande rouge, au profit de sources protéiques végétales. De plus en plus de gens déclarent diminuer ou souhaiter diminuer leur consommation de viande en baissant fortement la fréquence de sa consommation, ce qu'on appelle la tendance flexitarienne. Le concept du flexitarisme connaît une médiatisation croissante due à l'existence de facteurs favorables à sa popularisation dans la société (tels que le développement de l'offre, les politiques publiques incitatives ou les évolutions des valeurs et des pratiques de consommation). Il est possible de mesurer la progression du phénomène dans la population, notamment à l'échelle européenne, mais son caractère nécessite un déploiement d'enquêtes d'ampleur pour capter et analyser en détail cette partie de la population. En termes de profils de consommateurs, les flexitariens ne constituent pas un groupe unifié mais plutôt différents groupes selon les niveaux de rigueur et d'adhésion à la restriction de la viande. Il est cependant à noter quelques évolutions opposées selon le type de viande, avec notamment une croissance de la consommation de la volaille au détriment du bœuf. Plusieurs paramètres (motivations, valeurs, effets d'âge) laissent à penser que sa progression semble s'affirmer. Les consommateurs s'intéressent de plus en plus aux aspects de santé et de durabilité de leur régime alimentaire. La consommation de produits carnés continue de s'éroder, de façon accélérée, notamment en raison d'une image assez dégradée de la viande, à travers ses implications sur la santé, sur le bien-être animal, et plus récemment, et dans une moindre mesure, pour sa forte empreinte environnementale.

III. Les co-bénéfices potentiels environnementaux et de santé d'un passage à des régimes alimentaires plus végétalisés

Pour étudier l'alimentation durable et caractériser ses co-bénéfices potentiels, il convient de réaliser un état des lieux des différentes dimensions de la durabilité d'un régime alimentaire, puis des approches scientifiques multi-critères qui permettent d'évaluer ces différentes dimensions et d'identifier les évolutions dans les régimes qui les rendent plus durables.

III.1. Vers une alimentation durable

a. L'alimentation durable et ses différentes dimensions

Les systèmes alimentaires sont responsables d'un tiers des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) dues à l'activité humaine et les rendements agricoles sont menacés par les effets du changement climatique (Crippa *et al.*, 2021; Dinesh *et al.*, 2021). Ces dernières années, nous avons assisté à des appels croissants en faveur d'une transformation des systèmes alimentaires mondiaux en réponse à de multiples défis, dont le changement climatique. La commission EAT-Lancet a récemment présenté " La grande transformation alimentaire ", un appel urgent à la transformation de l'ensemble du système alimentaire, de la production à la consommation, afin de réduire l'impact environnemental total de notre système alimentaire actuel et futur (Willett *et al.*, 2019).

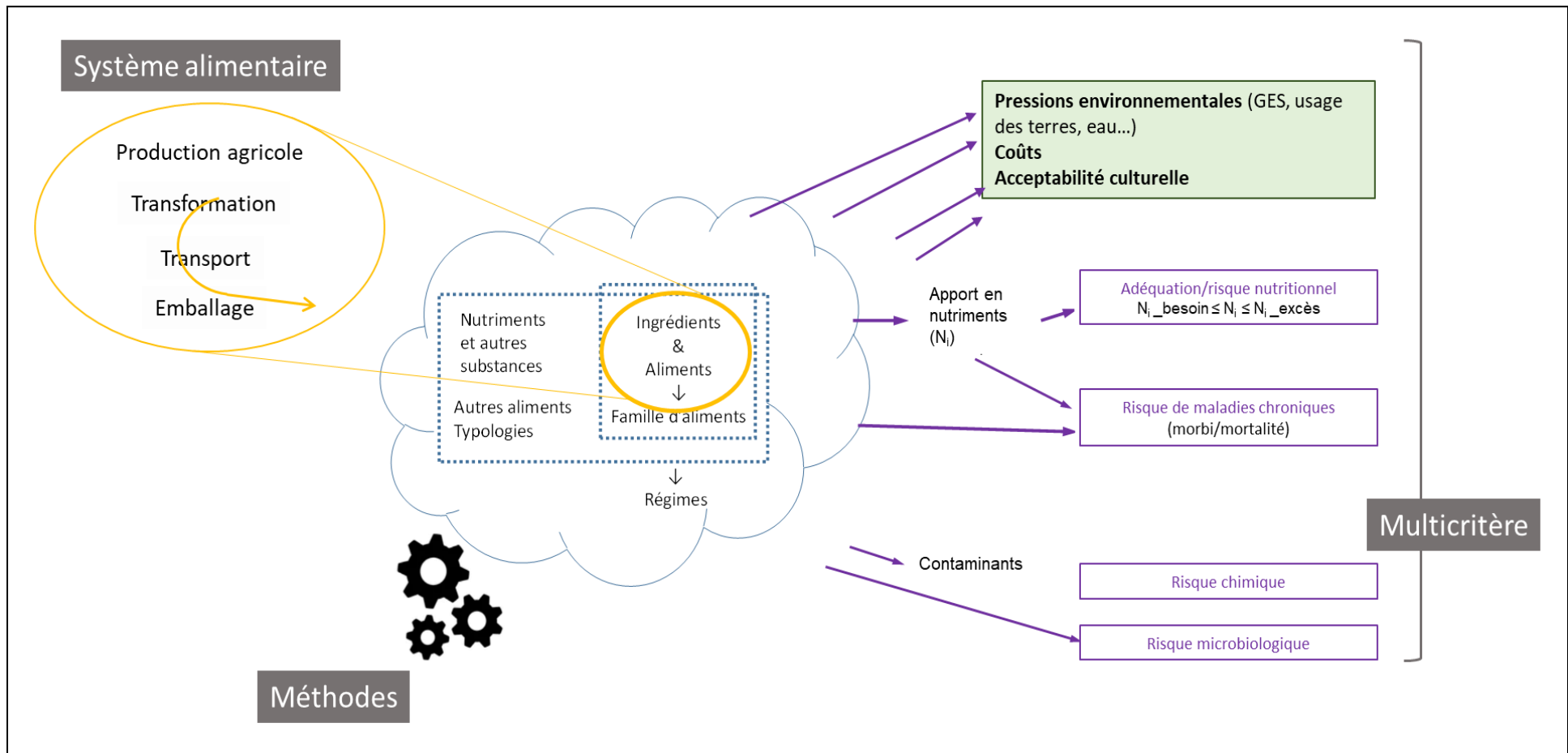
Les régimes alimentaires sont composés d'aliments dont la qualité sanitaire et nutritionnelle varie. De nombreux facteurs de nature très différente influencent le régime alimentaire d'une personne (Johnston *et al.*, 2014). Les habitudes alimentaires varient selon les régions, mais les régimes alimentaires mondiaux sont loin d'être optimaux. Dans la majorité des pays à hauts revenus, les régimes alimentaires sont riches en produits animaux mais aussi en sel, en graisses et en sucres (Hoy *et al.*, 2022; Jayedi *et al.*, 2020). Or, une mauvaise alimentation est désormais considérée comme un facteur de risque majeur de décès et d'invalidité (Fanzo and Davis, 2021a). Un décès sur cinq dans le monde serait associé à une mauvaise alimentation (Afshin *et al.*, 2019). La prévalence des maladies chroniques non transmissibles connaît une croissance exponentielle et affecte davantage les populations les plus précaires (FAO, 2021). L'alimentation représente une dimension majeure dans ce contexte, pouvant soit contribuer à favoriser le développement des maladies chroniques, soit le prévenir (Lichtenstein *et al.*,

2021). Comme nous l'avons vu dans la première partie de ce chapitre, les régimes alimentaires qui répondent aux références nutritionnelles des individus peuvent favoriser la santé globale, en tant que facteur préventif pour promouvoir une bonne santé tout au long de la vie. Leur rôle en tant que déterminants des maladies chroniques non transmissibles est désormais largement reconnu. La santé occupe une place de plus en plus centrale dans la réflexion sur la réforme des systèmes alimentaires. En outre, les modes de production agricole ont contribué à l'émergence de nouvelles préoccupations sanitaires, tels que les contaminants chimiques et microbiologiques (**Figure 12**) (Boué *et al.*, 2015; Membré *et al.*, 2021).

La performance environnementale et la nutrition ne sont pas les seules dimensions de la durabilité; l'économie et les variables socioculturelles doivent également être prises en compte (Cambeses-Franco *et al.*, 2022; Nicholls and Drewnowski, 2021). Le coût relatif des régimes alimentaires favorables à la santé et durables est essentiel pour leur adoption dans différents pays (Kabisch *et al.*, 2021). Cependant, on assiste à une montée en puissance de la préoccupation des individus pour une rémunération plus juste des producteurs et acteurs des filières agricoles (Gassie and Oudin, 2017). La littérature suggère que les régimes alimentaires durables sont généralement neutres en termes de coûts ou permettent de réaliser des économies, mais cette relation est encore controversée (Wilson *et al.*, 2019; Batis *et al.*, 2021; Benvenuti *et al.*, 2019). Enfin, le fait de s'alimenter dépend largement de facteurs socio-culturels. Autrement dit, on ne consomme pas seulement ce qui est biologiquement comestible, mais aussi ce qui est culturellement acceptable (Lebredonchel, 2021).

L'identification de régimes alimentaires durables par la communauté scientifique fait l'objet de développements méthodologiques (**Figure 12**)(Gazan *et al.*, 2018; Rohmer *et al.*, 2019; van Dooren, 2018a; Walker *et al.*, 2021). La conception d'un tel régime doit intégrer différentes dimensions de la durabilité du régime qui peuvent ne pas être compatibles les unes avec les autres. Parmi les méthodes d'évaluation multi-critère, l'optimisation permet une approche de l'alimentation complète, en combinant simultanément plusieurs dimensions de la durabilité, et peut aider à comprendre les relations entre ces différentes dimensions (Gazan *et al.*, 2018).

En résumé, la demande de nourriture implique des pressions environnementales importantes. L'amélioration continue de l'alimentation et de la nutrition des populations constitue un enjeu de santé publique. L'amélioration des pratiques environnementales pour atténuer le changement climatique et la perte de biodiversité constitue également un enjeu.



GES, gaz à effet de serre

Figure 12. Cadre conceptuel des systèmes alimentaires – régimes alimentaires et nutrition

(d'après Gazan, 2018; Rohmer, 2019; van Dooren, 2018; Walker, 2021; Boué, 2015; Membré, 2021)

b. Vers une alimentation qui préserve l'environnement dans un contexte d'augmentation de la population

Compte tenu de la croissance démographique, des migrations et du changement climatique, la garantie d'un avenir durable nécessitera un changement significatif des régimes alimentaires au cours des prochaines décennies (Fanzo and Davis, 2021b; Weindl *et al.*, 2020). La nécessité de garantir une alimentation nutritive suffisante à tous les habitants de la planète sans exercer de pressions excessives sur l'environnement représente un défi monumental. Il faut d'abord tenir compte des évolutions démographiques, soit deux milliards de personnes supplémentaires à nourrir en moins de 30 ans (+ 25% entre 2020 et 2050), et également anticiper le phénomène d'urbanisation croissante (plus de 70% de la population totale vivront en ville) et le souhait de peut-être trois milliards de personnes accédant à des revenus plus élevés désireuses de consommer davantage de sucres, d'huile, et surtout plus de viande (Neveu, 2021). Alors que la consommation de viande n'est plus l'apanage du Nord, l'impact de la production et de la consommation de produits animaux, et notamment de viande, figure en bonne place dans les débats sur l'avenir de l'alimentation.

Les systèmes alimentaires dépendent des ressources naturelles, alors que l'agriculture compte parmi les facteurs majeurs de dégradation de l'environnement, et est à l'origine du dérèglement climatique (Fanzo and Davis, 2021b; Birt *et al.*, 2017). L'une des questions les plus étudiées concerne les émissions de GES, notamment de dioxyde de carbone (CO₂), mais les estimations des émissions de GES varient considérablement d'une étude à l'autre (Poore and Nemecek, 2018; Xu *et al.*, 2021; ADEME, 2020). Les émissions mondiales de GES liées à la production d'aliments d'origine animale seraient plus importantes que celles liées à la production des aliments d'origine végétale (Clark *et al.*, 2019; Aleksandrowicz *et al.*, 2016), deux fois plus importantes d'après certains auteurs (Xu *et al.*, 2021). Les processus de production de viande et de produits laitiers représenteraient ~25% des émissions totales de GES, et 80% de celles spécifiques au secteur alimentaire (Chai *et al.*, 2019; Scarborough, Appleby, *et al.*, 2014). Des différences dans le type de viande consommée peuvent également être observées. De nombreuses études rapportent une augmentation des émissions de GES dans les régimes à forte consommation des viandes issues de ruminants (Arrieta and González, 2018; Niles *et al.*, 2018) qui correspondent exclusivement aux viandes bovines, ovines et caprines. Dans une publication de référence, Poore et Nemecek ont considéré les moyennes

mondiales des émissions de GES par aliment, basées sur une vaste méta-analyse de la production alimentaire couvrant 38 700 exploitations agricoles dans 119 pays (Poore and Nemecek, 2018). Les auteurs ont entre autre montré que l’empreinte carbone des viandes issues de ruminants (notamment le bœuf) est considérable par rapport à celle des produits végétaux (**Figure 13**) (Poore and Nemecek, 2018). Les émissions de GES ont été mesurées en kilogrammes d'équivalent CO₂ (kg CO₂eq) par kilogramme d'aliment. Une autre étude estime que la production de viande rouge génère 23% des émissions de GES liées à l'agriculture (Chai *et al.*, 2019; Esteve-Llorens *et al.*, 2019).

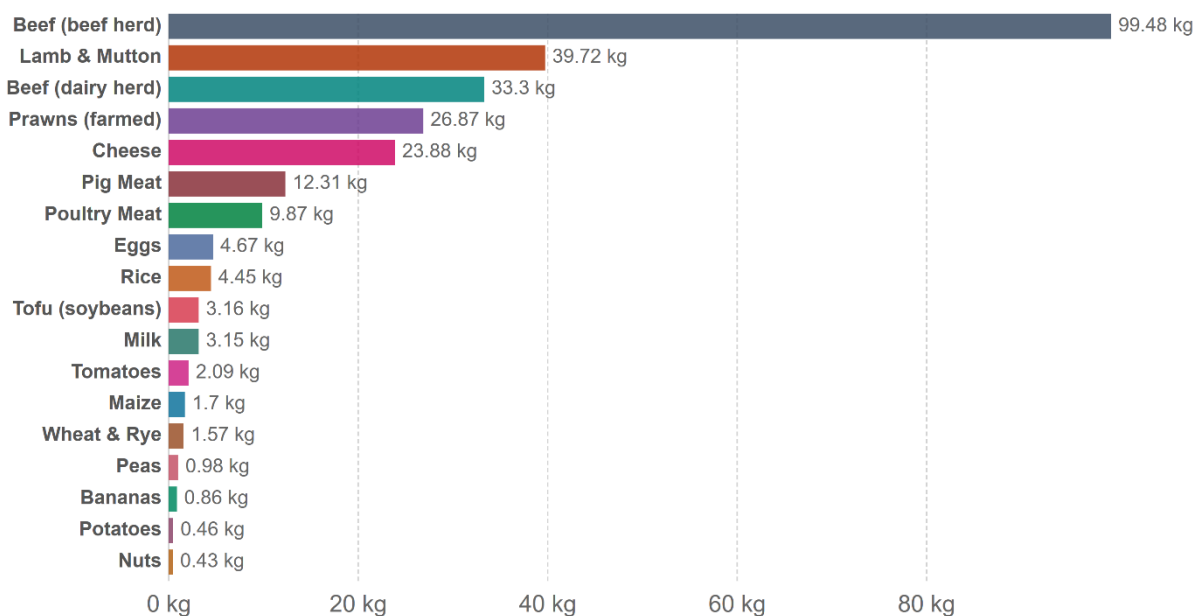


Figure 13. Émissions de GES (kg CO₂ eq) par kilogramme d’aliment

(extrait de Poore et Nemecek, 2018, Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers, supplementary materials, OurWorldInData.org)

Enfin, la production de sources protéiques animales est globalement plus exigeante que celle de sources protéiques végétales pour une multitude d’indicateurs autres que les GES tels que notamment la demande d’énergie cumulée, l’occupation des terres, l’eutrophisation ou l’acidification des sols (Pimentel and Pimentel, 2003; Reynolds *et al.*, 2014).

c. L'augmentation de la part des végétaux dans le régime alimentaire est associée à des pressions environnementales moindres

Il est largement admis aujourd'hui que des synergies peuvent être développées entre une production alimentaire écologiquement durable et une alimentation saine (van Dooren *et al.*, 2014; Friel *et al.*, 2009; McMichael *et al.*, 2007; Springmann, 2020). Le concept *One Health* (« une seule santé » en français) initié au début des années 2000 repose sur le principe selon lequel la protection de la santé de l'Homme passe par celle de l'animal et de leurs interactions avec l'environnement (Woods and Bresalier, 2014; Zinsstag *et al.*, 2015). À l'aide d'une cohorte d'environ 450 000 participants à l'étude EPIC, Laine *et al.* ont estimé les associations entre les contributions alimentaires aux émissions de GES et à l'utilisation des terres d'une part, et la mortalité toutes causes et causes spécifiques d'autre part. À l'aide de modèles de régression, ces auteurs ont conclu que le passage à des régimes alimentaires durables pourrait entraîner des avantages connexes, à savoir réduction de l'empreinte environnementale et contribution à l'atténuation du changement climatique d'une part, et amélioration de la santé des populations, d'autre part (Laine *et al.*, 2021).

Le passage à une consommation plus végétale présente à la fois un potentiel d'amélioration en terme d'impact environnemental, ainsi que des avantages concomitants sur la santé à long terme (Osei-Owusu *et al.*, 2022; Andreoli *et al.*, 2021; Jarmul *et al.*, 2020; Chai *et al.*, 2019; Rohmer *et al.*, 2018). Dans les 12 études examinées par Wilson *et al.*, les régimes optimisés pour la durabilité réduisaient la viande, en particulier les viandes de ruminants telles que le bœuf et l'agneau (bien que 6 des 12 études comportaient une augmentation du poisson dans les régimes)(Wilson *et al.*, 2019). La plupart des simulations rapportent que la réduction de la consommation de viande peut être un levier majeur pour baisser les émissions de GES (Chai *et al.*, 2019; Ferrari *et al.*, 2020; Fresán and Sabaté, 2019; Grasso *et al.*, 2021; Kesse-Guyot, Fouillet, *et al.*, 2021; Perignon, Masset, *et al.*, 2016; Tyszler *et al.*, 2016). Par exemple, l'étude de Wang *et al.* leur a permis de conclure que les réductions les plus importantes des émissions de GES associées au régime alimentaire ont été obtenues en remplaçant le bœuf par le tofu, les légumineuses et les noix (Wang *et al.*, 2021). Stylianou *et al.* ont récemment publié que le remplacement de seulement 10% de l'apport calorique quotidien provenant de la viande (notamment bœuf et charcuterie) par des fruits, légumes, noix et légumineuses et certains fruits de mer, permettrait d'obtenir une réduction de 33% de l'empreinte carbone alimentaire,

et des améliorations substantielles de la santé, soit 48 minutes gagnées par personne et par jour (Stylianou *et al.*, 2021).

Sous condition d'être bien planifié, un régime fortement végétalisé par rapport à la norme occidentale et durable sur le plan environnemental peut être suffisant sur le plan nutritionnel (Broekema *et al.*, 2020; Grasso *et al.*, 2021; Tyszler *et al.*, 2016). En France, en utilisant les données de l'étude INCA3, de Gavelle *et al.* ont montré que l'augmentation systématique de la part des végétaux limiterait légèrement le gain en termes d'adéquation nutritionnelle, mais aboutirait à des régimes beaucoup plus durables (de Gavelle *et al.*, 2020). Le choix des aliments de substitution est crucial pour assurer l'adéquation nutritionnelle (Salomé *et al.*, 2020). Broekema *et al.* ont utilisé l'optimisation non linéaire pour générer des régimes qui préservent le plus fidèlement possible le régime alimentaire néerlandais, tout en répondant aux objectifs en termes d'émissions de GES et en respectant les contraintes d'apports en nutriments. Les régimes modélisés qui étaient présentés comme une stratégie potentielle d'atténuation du changement climatique, étaient caractérisés par une forte proportion d'aliments d'origine végétale par rapport à la proportion observée dans le régime moyen des adultes néerlandais (**Tableau 8**) (Broekema *et al.*, 2020). Les régimes modélisés selon le scénario 2030 nécessitaient des diminutions importantes (<33% des valeurs de référence) de bœuf, porc, fromage, « snacks » et beurre, et des augmentations notables (>150% des valeurs de référence) de légumineuses, produits de la mer, fruits à coques, noix, légumes, et aliments et boissons à base de soja (Broekema *et al.*, 2020).

En résumé, parmi les études ayant évalué les co-bénéfices potentiels d'un passage à des régimes alimentaires à la fois davantage favorables à la santé et avec une meilleure performance environnementale, plusieurs d'entre elles ont montré que des changements ciblés dans les régimes alimentaires, à savoir de petites substitutions alimentaires par des alternatives écologiquement durables, peuvent fournir des gains considérables pour l'environnement et la santé des individus, et, si elles sont bien planifiées, réduire considérablement l'impact environnemental sans compromettre l'adéquation des nutriments.

Food group	Baseline diet among Dutch adults	No-GHGE-target scenario	Relaxed-GHGE-target scenario	2030 scenario (sensitivity range ²)	2050 scenario
Grains and starches					
Rice, wheat, corn, and other	225	268	278	289 (278, 295)	293
Potatoes and cassava	114	112	112	109 (105, 112)	86
Vegetables					
Dark green vegetables	51	93	80	65 (58, 77)	145
Red and orange vegetables	50	77	59	38 (33, 46)	33
Other vegetables	45	76	73	70 (62, 80)	153
Fruits					
All fruit	116	134	119	99 (94, 105)	16
Dairy foods					
Cheese	39	26	19	3 (0, 10)	0
Liquid dairy	371	364	368	363 (348, 376)	128
Butter	6	0	0	0 (0, 0)	0
Protein sources					
Beef and lamb	44	37	0	0 (0, 0)	0
Chicken and other poultry	30	26	22	11 (5, 17)	0
Pork	56	24	17	10 (5, 19)	0
Eggs	11	13	15	17 (12, 21)	0
Fish and shellfish	18	44	54	48 (42, 57)	52
Dry beans, lentils, and peas	4	37	30	23 (17, 31)	0
Soy foods	0	5	6	5 (1, 9)	0
Tree nuts	2	20	35	55 (44, 59)	63
Peanuts	14	20	28	36 (30, 40)	17
Added fats					
Unsaturated oils	28	16	12	10 (8, 16)	27
Sugars and snacks					
Sugar and confectionary	44	36	31	23 (14, 31)	0
Cakes	56	37	37	31 (24, 36)	23
Snacks	9	6	2	0 (0, 0)	0
Other foods					
Condiments and sauces	24	12	14	9 (5, 13)	0
Soups and bouillon	63	61	53	36 (29, 42)	0
Beverages					
Alcoholic beverages	212	210	200	203 (200, 205)	132
Nonalcoholic beverages	2118	2117	2112	2102 (2097, 2105)	1797
Soy drink ³	9	10	14	19 (15, 23)	96
Greenhouse gas emissions, kg CO ₂ -eq pppd	4.21	3.65	2.5	2.04	1.11
Fossil energy use, MJ pppd	37.2	40.5	32.8	27.8	19.6
Land occupation, m ² a pppd	4.65	4.34	3.26	3.11	2.79

¹ kg CO₂-eq kilograms of carbon dioxide equivalent ; MJ, megajoules ; m²a, square meters annually ; pppd, per person per day.

² The robustness of the 2030 scenario to uncertainties in the nutritional and environmental data was tested via 1000 Monte Carlo simulations.

³ Soy drink is a fortified product with vitamin B-12 and calcium.

Tableau 8. Consommations alimentaires (en g/j) et indicateurs environnementaux relatifs au régime moyen actuel des adultes néerlandais et relatifs à 4 scénarios avec différents objectifs de réduction des émissions de GES liés au système alimentaire

(extrait de Broekema, 2020, Future-proof and sustainable healthy diets based on current eating patterns in the Netherlands, Am J Clin Nutr 2020;112:1338–1347, p. 1342)

III.2. Optimisation de régimes alimentaires, une approche multi-critère

De nombreuses approches innovantes sont décrites dans la littérature portant sur l'alimentation durable, telles que les approches par l'épidémiologie nutritionnelle, par la déviance positive, ou encore par simulation de substitutions alimentaires, par exemple, en simulant le remplacement totale ou partielle de la viande ou des produits animaux par des produits végétaux (Salomé, Huneau, *et al.*, 2021). Nous allons voir ici que l'optimisation mathématique multi-critères permet de dépasser certaines limites relatives à ces approches.

a. L'optimisation est un outil puissant pour concevoir des régimes atteignant des objectifs multiples

Plusieurs études portent sur des régimes théoriques ou scénarios théoriques d'évolutions de consommation, et comparent un régime moyen observé avec un ou des régimes modélisés (Aleksandrowicz *et al.*, 2016; Mertens *et al.*, 2017). La plupart de ces études aboutissent à des régimes plus durables sur un critère, et nécessitent une étude d'impact pour évaluer les régimes obtenus selon d'autres critères de durabilité. Par exemple, une limite de la simulation est que la composition nutritionnelle des régimes simulés est souvent évaluée *a posteriori*, si bien que ce critère n'est pas obligatoirement amélioré, et peut même se dégrader par rapport à la situation observée de départ. Ainsi, des régimes identifiés par la déviance positive ou par substitution de la viande et des produits laitiers par des produits d'origine végétale dans un échantillon représentatif d'une population peuvent ne pas garantir le respect de la totalité des références nutritionnelles (Lapping *et al.*, 2002; Seves *et al.*, 2017). Les pressions environnementales différentielles associées aux types de régimes alimentaires ne garantissent pas une qualité nutritionnelle adéquate de ces régimes, et certains impacts moindres sur l'environnement rapportés pour les régimes végétalisés peuvent donc être contre-productifs sur le plan nutritionnel. C'est le cas par exemple de la version végétalienne du régime présenté comme durable par la Commission EAT Lancet, mais dont les limites en termes d'impact santé ont été soulignées dans des études ultérieures (Knuppel *et al.*, 2019; Zgmutt *et al.*, 2020). Les auteurs reconnaissent les risques de déficiences d'apport en certains nutriments (Springmann, Wiebe, *et al.*, 2018).

Comme vu précédemment, le système alimentaire est une source majeure d'émissions de GES et d'autres impacts qui sont largement considérés comme non durables à l'échelle mondiale,

et dans le même temps, les mauvaises habitudes alimentaires sont liées à de nombreuses maladies et problèmes de santé. Les implications environnementales des choix alimentaires font l'objet de recherches de plus en plus approfondies, mais on connaît moins par exemple les compromis entre les impacts environnementaux et la qualité nutritionnelle de l'alimentation, ou bien les différents impacts selon les habitudes alimentaires des catégories socio-professionnelles d'un pays (He *et al.*, 2021).

Les méthodes qui peuvent potentiellement intégrer simultanément plusieurs dimensions sont donc considérées comme une stratégie pour résoudre ces problèmes interconnectés. Des auteurs ont développé des modèles d'optimisation sous contraintes pour concevoir des régimes plus durables qui sont potentiellement un compromis entre les différentes dimensions de nutrition/santé, de performance environnementale, de durabilité économique et d'acceptabilité culturelle. Les outils de programmation linéaire ou non (LP ou NLP) utilisés en optimisation présentent un potentiel considérable pour trouver des solutions à une variété de problèmes alimentaires très complexes. A titre d'exemple, Reynolds *et al.* ont développé un modèle d'optimisation par programmation linéaire pour caractériser les changements alimentaires nécessaires pour que la population britannique adopte des régimes répondant à des objectifs multiples, à savoir qui respectent les références nutritionnelles et diététiques favorables à la santé, émettent moins de GES et soient abordables pour différents groupes de revenus, en tenant compte des budgets alimentaires et des aliments achetés, ce qui permettait en parallèle de maintenir les changements alimentaires au minimum (Reynolds *et al.*, 2019). Outre la réduction des impacts environnementaux d'origine alimentaire ou le respect des références nutritionnelles, il est possible d'inclure dans les modèles d'optimisation d'autres considérations telles que la biodisponibilité des nutriments (qui peut différer selon l'origine animale ou végétale des aliments), ou encore la coproduction entre aliments (pour faire le lien entre les productions de viande bovine et de lait notamment)(van Dooren, 2018a).

Sur le plan méthodologique, l'optimisation du régime vise à trouver la combinaison optimale d'aliments pour une population, une sous-population ou un individu qui remplit un ensemble de contraintes tout en minimisant ou en maximisant une fonction objective, qui elle-même peut se décomposer en plusieurs sous-objectifs (Gazan *et al.*, 2018). Les différentes méthodes d'optimisation mono- ou multi-objectif (ou multi-critères) des régimes alimentaires utilisées dans la littérature ont été décrites dans un article récemment publié par Abejón *et al.*, qui

précise notamment la formulation mathématique du ou des objectifs optimisés (**Tableau 9**) (Abejón *et al.*, 2020). Les contraintes restreignent le champ des possibles pour les solutions du problème d'optimisation, tandis que les objectifs permettent de trouver la solution unique correspondant au meilleur compromis entre fonctions objectifs à optimiser dans ce champ des possibles (van Dooren, 2018a). Des techniques associées à l'optimisation (*duals*) permettent d'explorer quelles sont les contraintes les plus limitantes ou actives (*i.e.*, celles dont le relâchement ou la suppression permettrait d'améliorer le critère optimisé) et de les distinguer des contraintes non limitantes ou inactives (Bazaraa *et al.*, 2006).

Optimization Method	Objective Function
Linear programming (LP)	$\text{Min } f = \sum_{i=1}^n e_i x_i = e_1 x_1 + \dots + e_n x_n$
Multi-objective target programming (MTP)	$\text{Min } f = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \frac{(\sum_{i=1}^n e_{ji} x_{opt,i}) - e_{base,j}}{e_{base,j}} + \frac{1}{2} \frac{(\sum_{i=1}^n c_i x_{opt,i}) - c_{base}}{c_{base}}$
Non-linear programming (NLP)	$\text{Min } f = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{opt,i} - x_{base,i}}{x_{base,i}} \right)^2$

e, impact environnemental ; x, quantité consommée d'un aliment (en g) ; c, coût ;

n, nombre d'aliments dans le régime ; i : aliment i

opt, régime optimal ; base, régime de base ou observé ; j, impact environnemental j

Tableau 9. Définition des fonctions objectives des différents types de méthodes d'optimisation utilisées pour concevoir des régimes alimentaires durables

(extrait de Abejón, 2020, Multi-Objective Optimization of Nutritional, Environmental and Economic Aspects of Diets Applied to the Spanish Context, p.2)

En résumé, les algorithmes d'optimisation permettent d'améliorer la prise en compte concomittente des différentes dimensions de la durabilité, notamment entre la santé et la nutrition d'une part, et la durabilité environnementale et la résilience des systèmes alimentaires d'autre part, afin de proposer des solutions pour la transformation des systèmes alimentaires qui sera capable de répondre aux défis politiques actuels et futurs. Ainsi, les résultats de l'optimisation du régime alimentaire peuvent aider à promouvoir des systèmes alimentaires durables, contribuer à la définition des recommandations alimentaires, ou encore à traiter des problèmes de sécurité alimentaire dans les pays à faibles revenus.

b. L'optimisation sur des critères de santé, d'environnement, d'acceptabilité ou de coût

La littérature portant sur le développement de modèles en lien avec la durabilité des régimes est en plein essor. Wilson *et al.* ont publié une revue de la littérature en 2019 sur les études récemment publiées dans lesquelles une optimisation a été utilisée pour atteindre des objectifs de nutrition et de durabilité environnementale (Wilson *et al.*, 2019). Ces études ont notamment évalué l'effet de scénarios de transition alimentaire sur des paramètres de santé. D'après plusieurs études, il serait possible d'optimiser les régimes alimentaires en fonction de leur impact sur l'environnement tout en maintenant un équilibre nutritionnel élevé et en s'écartant le moins possible du régime de base (Broekema *et al.*, 2020; Kramer *et al.*, 2017; Perignon, Masset, *et al.*, 2016). Par une méthode d'optimisation sur la cohorte NutriNet-Santé, Seconda *et al.* ont montré que pour identifier des régimes alimentaires qui répondent aux principales références nutritionnelles tout en réduisant les impacts de leur production sur l'environnement (émissions de GES, utilisation des terres, et énergie nécessaire à la production des régimes), il était nécessaire d'augmenter les consommations de fruits et légumes, de féculents, et de soja et de diminuer les aliments d'origine animale ainsi que les aliments gras et sucrés ou salés (Seconda *et al.*, 2018). Par ailleurs, une équipe néerlandaise a cherché à réduire au minimum les changements apportés au régime alimentaire actuel de manière à ce que les références nutritionnelles (30 micro- ou macronutriments) soient atteintes tout en imposant des réductions progressives de l'impact environnemental (Kramer *et al.*, 2017). Les auteurs ont conclu que la réduction de la viande était l'option la plus efficace pour diminuer l'impact environnemental des régimes alimentaires quel que soit le sexe. Ils ont identifié un point critique au-delà duquel des contraintes nutritionnelles sont devenues bloquantes. Au point critique, la consommation de viande était de 65 g/j chez les hommes et de 43 g/j chez les femmes. Les auteurs ont rapporté que l'ALA était toujours limitant, et que les autres nutriments fréquemment limitants étaient la vitamine A, le sodium, les fibres et le fer ingéré (ce dernier, surtout chez les femmes en âge de procréer). Au-delà du point critique, d'autres nutriments étaient limitants tels que la thiamine, le calcium et le sélénium ; cependant, les apports moyens en AAI étaient toujours plus de deux fois égaux au besoin minimal, et les EPA et DHA n'étaient pas limitants (car les régimes modélisés contenaient un surplus de poisson) (Kramer *et al.*, 2017).

Quelques études ont appliqué une méthodologie comparative pour évaluer ce à quoi ressembleraient des régimes à faible impact en fonction du pays. Les résultats, dont les enjeux sont multiples, soulignent l'importance de considérer les décisions de production et de consommation dans un cadre intégré et global (Chaudhary and Krishna, 2019; Walker *et al.*, 2021). Chaudhary et Krishna ont ainsi utilisé un modèle d'optimisation non linéaire avec un plan d'étude par pays pour identifier les régimes alimentaires de 152 pays qui respectent 4 contraintes d'acceptabilité culturelle, 5 limites environnementales planétaires liées à l'alimentation et les apports quotidiens recommandés pour 29 nutriments (**Figure 14**) (Chaudhary and Krishna, 2019). Les résultats ont montré que les changements nécessaires dans les quantités consommées de 221 aliments étaient très spécifiques à chaque pays mais, en général, ils indiquent la nécessité de réduire les consommations de viande, de produits laitiers, de riz, et de sucres, et d'augmenter les consommations de fruits, de légumes, de légumineuses, de noix et d'autres produits céréaliers. Selon les auteurs, les contraintes relatives aux fibres, aux vitamines B12 et E, et aux AGS étaient les plus difficiles à respecter (**Tableau 10**) (Chaudhary and Krishna, 2019). Les auteurs ont également calculé un gain global et agrégé relatif aux empreintes environnementales qui résulteraient de l'adoption par tous les pays du régime optimisé durable, et montré que cela réduirait les émissions de GES de 32%, la consommation d'eau bleue de 8%, l'épandage d'azote de 12%, et l'épandage de phosphore de 13%, tout en maintenant l'utilisation mondiale des terres cultivées à des niveaux presque identiques aux niveaux actuels (Chaudhary and Krishna, 2019).

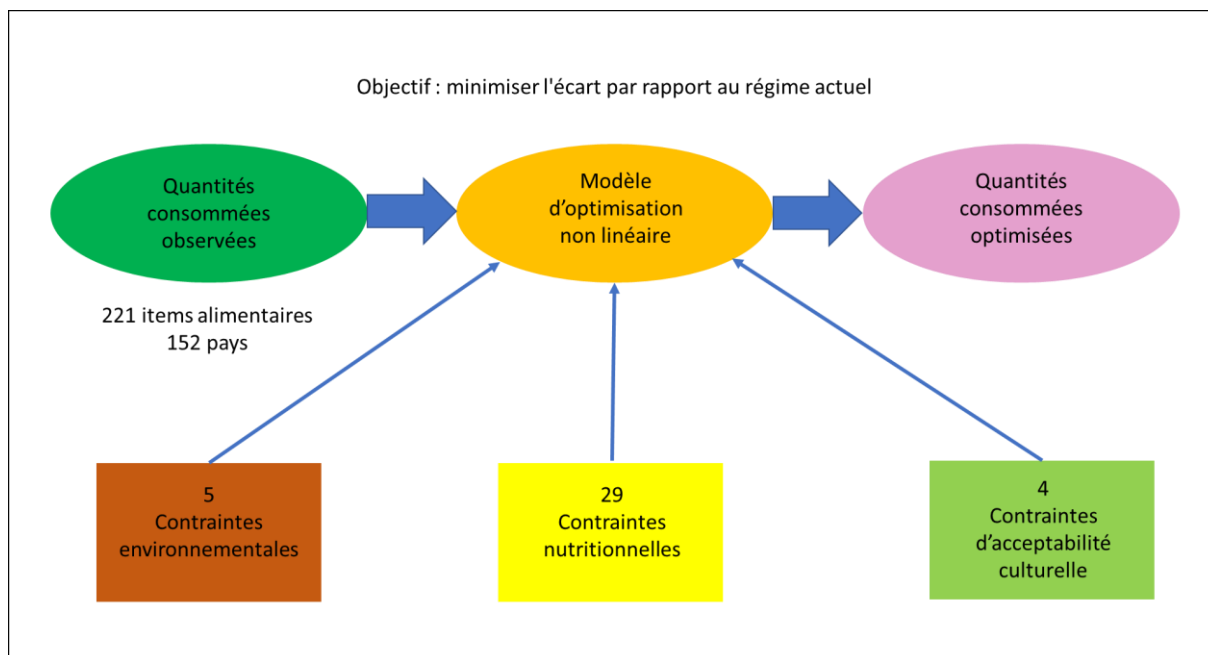


Figure 14. Principe schématique du modèle d'optimisation non linéaire visant à identifier les régimes alimentaires de 152 pays, et qui intègre des critères d'acceptabilité culturelle, environnementaux, et nutritionnels

(traduit de Chaudhary and Krishna, 2019, Country-Specific Sustainable Diets Using Optimization Algorithm, p.A)

D'autres études ont développé une méthodologie d'optimisation pour définir des régimes alimentaires durables qui respectant les enjeux environnementaux, nutritionnels et de santé, mais également des enjeux économiques (Seconda *et al.*, 2018; Abejón *et al.*, 2020; Lucas *et al.*, 2021). Une équipe italienne a analysé au moyen de l'ensemble des solutions de Pareto le compromis entre les objectifs de leur modèle, qui consistaient à réduire les émissions de GES associées aux menus de la restauration collective tout en réduisant également le prix de ces menus (**Figure 15**) (Benvenuti *et al.*, 2019). En outre, étant donnée la nature potentiellement conflictuelle des différents aspects de la durabilité, Rohmer *et al.* ont constaté que les choix des indicateurs utilisés joue un rôle crucial (Rohmer *et al.*, 2019).

Nutrient	Recomm.	Scenario	EAP	EUCA	LAC	MENA	NA	SA	SSA	China	India
Fiber	>29 g	Current	16	18	18	24	17	13	23	24	19
		Optimized	29	31	30	32	34	28	30	35	29
Riboflavin	>1.1 mg	Current	0.9	1.7	1.2	1.4	1.7	0.9	0.9	1.7	0.9
		Optimized	1.3	1.6	1.4	1.5	1.5	1.3	1.4	1.7	1.3
Calcium	>520 mg	Current	399	1095	660	673	1207	595	430	761	644
		Optimized	560	722	606	671	798	572	546	813	589
Choline	>550 mg	Current	272	473	340	364	465	188	261	488	365
		Optimized	556	563	562	562	558	558	562	573	580
Potassium	>3247 mg	Current	2371	4025	3159	3720	4024	2234	3662	4251	2708
		Optimized	4057	4747	4615	4633	5177	3851	4459	5335	4043
Vitamin E	>10 mg	Current	6.4	18.3	9.7	13.6	15.7	6.5	8.4	9.5	6.9
		Optimized	11.7	11.4	12.1	12.3	10.0	11.4	12.3	12.2	12.2
Vitamin K	>80 µg	Current	81	114	72	91	233	30	43	255	51
		Optimized	136	158	126	150	172	133	122	215	131
Vitamin B12	>2.2 µg	Current	3.7	8.5	7.6	4.3	6.9	2.0	3.2	4.6	1.2
		Optimized	4.4	3.1	4.4	5.6	2.3	5.1	5.3	2.5	5.2
Sat. fats	<23 g	Current	27	44	30	22	51	23	17	21	18
		Optimized	20	22	20	20	22	21	19	21	19
Sugar	<125 g	Current	94	163	160	149	185	69	76	65	88
		Optimized	73	99	89	92	107	62	73	91	73

East Asia and Pacific (EAP), Europe and Central Asia (EU&CA), Latin America and Caribbean (LAC), Middle-east and North Africa (MENA), North America (NA), South Asia (SA), and Sub-Saharan Africa (SSA).

Tableau 10. Apports en fibres, en riboflavine, en calcium, en choline, en potassium, en vitamines E, K et B12, en AGS et en sucres (par habitant et par jour) relatifs aux régimes actuels et optimisés pour les neuf régions du monde

(traduit de Chaudhary and Krishna, 2019, Country-Specific Sustainable Diets Using Optimization Algorithm, p.D)

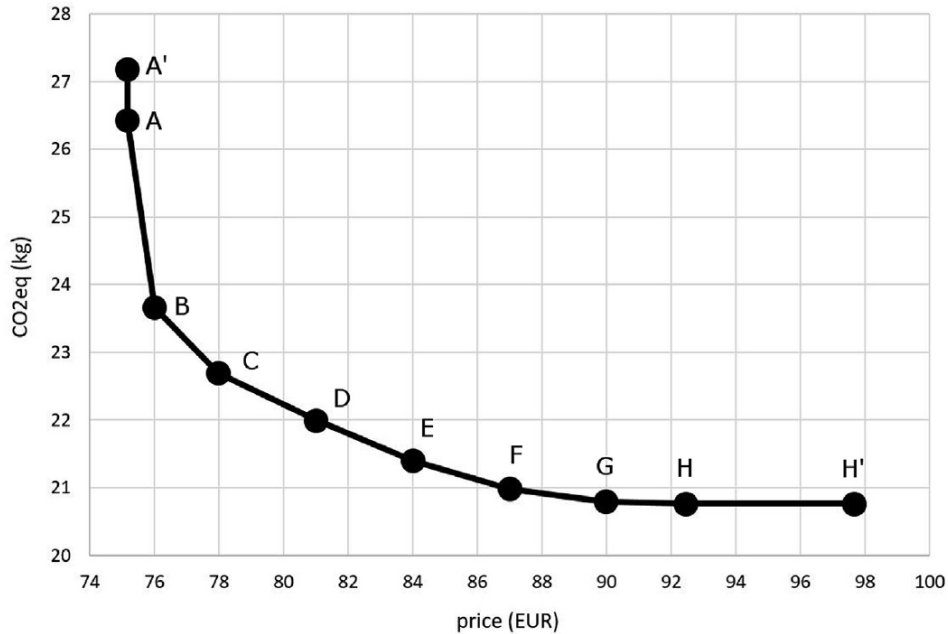


Figure 15. Relation entre le prix et les émissions de GES des menus optimaux
(extrait de Benvenuti, 2019, Concurrent economic and environmental impacts of food
consumption: are low emissions diets affordable?, p.6)

c. Prise en compte de l'acceptabilité culturelle dans les démarches prospectives

Les données de base des enquêtes observationnelles utilisées en épidémiologie nutritionnelle sont l'alimentation telle que réellement choisie par les individus dans leur vie quotidienne, et il est donc raisonnable de supposer que ces comportements ou choix alimentaires sont culturellement acceptables pour la majorité des individus enquêtés. Néanmoins, la question de la représentativité de l'échantillon de l'enquête par rapport à une population générale se pose plus ou moins, selon qu'il s'agit d'une enquête nationale ou d'une cohorte. L'épidémiologie nutritionnelle, qui repose sur les consommations alimentaires réellement observées dans une population, respecterait donc davantage le volet de l'acceptabilité socio-culturelle de l'alimentation durable que d'autres approches comme la modélisation de scénarios théoriques (simulations, optimisation globale sous contraintes, ou encore évaluation comparative des risques). La plupart des études basées sur des scénarios théoriques utilisent des données d'enquêtes mais vont au-delà de l'analyse descriptive, et l'approche théorique nécessite souvent d'utiliser diverses méthodes complémentaires pour mieux prendre en compte l'acceptabilité, autrement dit pour ne pas considérer simplement

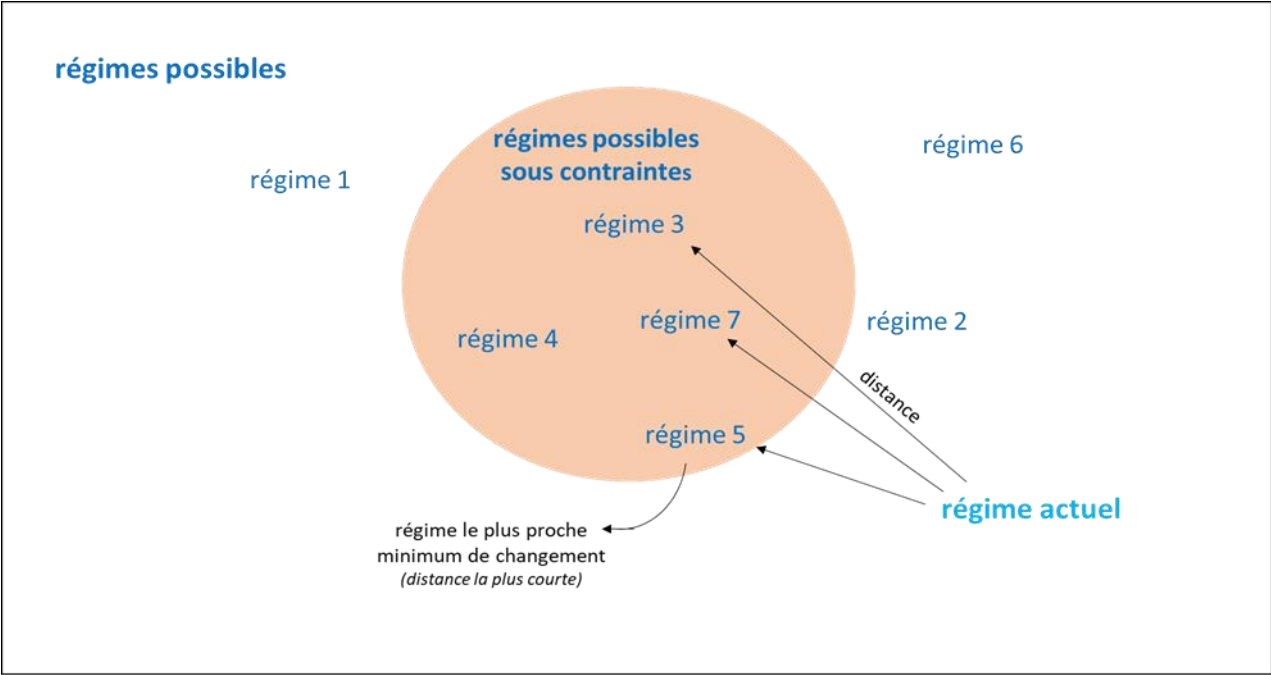
qu'il suffirait de faire la promotion des régimes prospectifs modélisés pour que les consommateurs les adoptent.

Plusieurs méthodes sont décrites dans la littérature pour préserver au mieux le contexte alimentaire culturel du régime de départ, qui est susceptible de jouer un rôle important dans la caractérisation des régimes modélisés comme durables pour des populations spécifiques (Eustachio Colombo *et al.*, 2021). Les solutions obtenues en modélisation sont largement dépendants du paramétrage utilisé. L'intérêt de prendre en compte l'acceptabilité culturelle dans la conception de régimes alimentaires durables est notamment de pouvoir identifier des régimes relativement variés en termes de groupes alimentaires. Ainsi, dans le travail de modélisation du régime moyen français conduit par l'Anses en 2016, l'identification des solutions a été influencée par les choix et compromis pris dans le codage de l'acceptabilité, à savoir (i) normaliser l'objectif pour s'affranchir des différences d'échelle entre les quantités consommées des groupes alimentaires, (ii) borner les consommations aux 5^e et 95^e centiles de population, et (iii) pondérer la composition nutritionnelle de chaque groupe d'aliments par les niveaux de consommation. Plus précisément, le premier levier pour tenir compte de l'acceptabilité a été d'introduire l'objectif de ne pas trop s'éloigner de la consommation moyenne, afin de préserver, autant que possible, les aspects culturels associés aux régimes de départ. Dans cette étude, l'écart quadratique par rapport à la consommation observée (programmation non linéaire, NLP) favorisait de faibles variations de chaque aliment, tandis qu'une autre alternative aurait été de minimiser la déviation par programmation linéaire, ce qui aurait eu d'autres incidences en favorisant des variations plus élevées de quelques groupes alimentaires (**Figure 16**) (Kramer, 2016). Le second levier a été d'introduire des contraintes dites d'« acceptabilité » pour borner les consommations, afin que les niveaux de consommation proposés par l'outil d'optimisation restent dans une gamme d'apports réalistes. Ces limites ont été définies à partir de la distribution des consommations d'aliments ou groupes alimentaires. Cette démarche permet de limiter d'éventuels risques liés à de fortes consommations de constituants alimentaires initialement peu consommés, pour lesquelles on ne dispose pas d'un certain recul, contrairement aux quantités d'aliments réellement consommées par certains individus. Enfin, un autre levier intervenait dès la constitution des groupes alimentaires constituant les régimes, notamment lors du calcul des teneurs moyennes en chaque nutriment, estimées pour chacun des groupes alimentaires. Ces teneurs

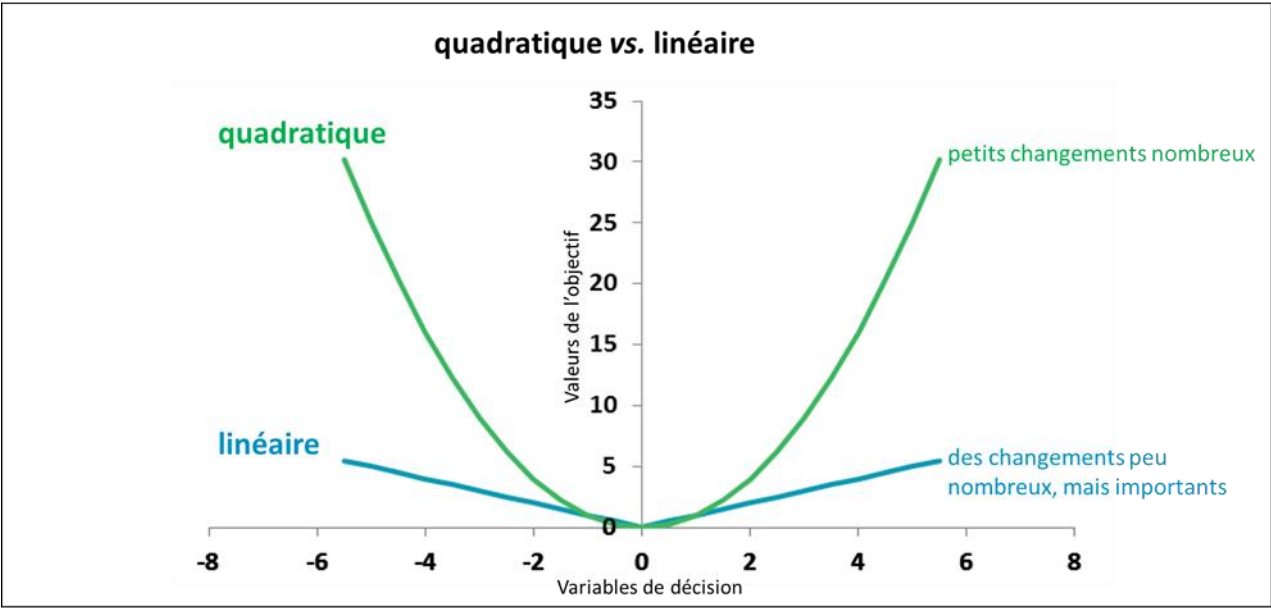
ont été calculées en pondérant la composition nutritionnelle de chaque aliment constituant le groupe par la part représentée par sa consommation au sein du groupe observée dans l'étude INCA2, et ce, pour chaque population étudiée (Mariotti *et al.*, 2021; Anses, 2016b). En France, une autre étude réalisée sur les données de l'enquête INCA2 a pris en compte l'inertie alimentaire (qui repose sur l'hypothèse que les individus sont *a priori* réfractaires aux changements de comportement alimentaire) en décrivant des trajectoires de changement par des successions pas à pas, destinées à améliorer la qualité nutritionnelle du régime (de Gavelle *et al.*, 2019).

D'autres auteurs, quant à eux, ont développé un score de pénalité, en pénalisant les changements proportionnellement à la popularité ou aux quantités consommées, afin de prendre en compte les préférences alimentaires dans les changements de régimes par rapport aux consommations observées aux Pays-Bas, telles que rapportées dans une enquête nationale (Kramer *et al.*, 2017; Tyszler *et al.*, 2016).

De manière plus générale, la revue narrative effectuée par van Dooren débouchait sur la conclusion qu'il n'y a jamais eu d'évaluation *a posteriori* des hypothèses émises, et qu'aucune étude n'a encore trouvé une « solution ultime » pour prendre en compte l'acceptabilité dans les transitions de changement alimentaire (van Dooren, 2018b). La démarche est paradoxale, puisqu'il s'agit de concevoir des perspectives de changements alimentaires, en anticipant le futur à partir des consommations actuelles, voire passées. Les conséquences de cette démarche en termes d'acceptabilité face aux changements sont discutables. Gazan *et al.* ont souligné que l'« acceptabilité » était difficile à évaluer, notamment parce qu'il n'y a pas de fonction permettant de mesurer objectivement l'acceptabilité alors que cette notion même renvoie plus largement aux comportements alimentaires et aux subjectivités individuelles (par exemple, l'attention aux propriétés sensorielles d'un aliment joue un rôle dans l'acceptabilité) (Gazan *et al.*, 2018; Agovi *et al.*, 2022).



Minimisation de l'écart par rapport au régime observé actuel



Sensibilité relative au choix du modèle

Figure 16. Schéma de l'acceptabilité dans la modélisation de régimes durables
(d'après Kramer, 2016)

Conclusion partielle de la troisième partie

Les systèmes alimentaires actuels ont un impact élevé sur l'environnement. Afin de participer à la protection de notre environnement et de la santé des individus, il s'avère nécessaire d'orienter la transformation des systèmes de production alimentaire vers des systèmes qui assurent la couverture des besoins énergétiques de la population, et qui respectent l'environnement et les règles éthiques d'une part, et de tendre vers des régimes alimentaires qui réduisent le risque de maladies chroniques et assurent la sécurité d'apport en nutriments d'autre part. En effet, parmi les facteurs de risque sur lesquels il faudrait agir pour réduire la mortalité par maladies chroniques non transmissibles, certains sont directement liés à notre alimentation. Dans la majorité des régions du monde, les régimes actuels sont sous-optimaux et contiennent des quantités excessives de viande rouge, de viande transformée et de boissons sucrées, et des consommations insuffisantes de fruits, légumes, légumineuses, produits céréaliers complets, noix et graines. Le consensus qui se dégage de la communauté scientifique est de réduire la consommation de produits animaux dans les pays à hauts revenus, afin de permettre une meilleure santé planétaire et humaine, l'empreinte environnementale des produits animaux étant globalement bien plus importante que celle des produits végétaux. L'impact environnemental de différents régimes alimentaires plus ou moins restrictifs sur la consommation de produits animaux a été largement étudié. La transition alimentaire dans les pays à hauts revenus se raisonne à différents niveaux de qualité nutritionnelle et en fonction des sous-populations. Parmi les méthodes d'évaluation multi-critère, l'optimisation des régimes alimentaires est un outil puissant pour gérer les différentes dimensions de durabilité et leurs compromis, en identifiant par exemple la meilleure combinaison de groupes alimentaires 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. Enfin, l'optimisation peut s'avérer utile dans le domaine de la recherche en nutrition, pour mener des analyses de sensibilité sur les freins nutritionnels (identifiés comme les contraintes limitantes de besoins en nutriments) et les leviers diététiques (identifiés comme des changements dans les groupes d'aliments qui fournissent les nutriments limitants).

Chapitre 2 - Travaux de thèse

I. Justification des travaux - objectifs

L'introduction bibliographique nous a permis de faire un état des lieux de la littérature sur la problématique des régimes durables dans les pays à haut revenu. On a pu voir que cette problématique s'inscrit dans le contexte des transitions nutritionnelles qui s'amorcent et qui consistent en une végétalisation des régimes. C'est un phénomène pérenne, appuyé par les recommandations publiques et les aspirations des consommateurs (Cámara *et al.*, 2021; Magkos *et al.*, 2019). Les pays occidentaux suivent une tendance à la baisse de la consommation de viande, qui s'accélère dans certaines populations (Nungesser and Winter, 2021). Ainsi, pour une assez large partie de la population française, qualifiée de flexitarienne ou pro-flexitarienne, les intentions sont évidentes et la mutation est en cours sous nos yeux (Dagevos, 2021; de Gavelle, Davidenko, *et al.*, 2019). Des régimes alimentaires caractérisés par des profils diététiques globaux davantage favorables à la santé ont été identifiés (Hemler and Hu, 2019a). C'est le cas du célèbre régime EAT-lancet, ou des régimes de référence pescolacto-ovo-végétariens (Willett *et al.*, 2019; *Nordic Council of Minister*, 2014; Trichopoulou *et al.*, 2014). Cependant, il a été avancé que ces régimes peuvent diminuer l'adéquation nutritionnelle des régimes, dans laquelle la viande joue un rôle très important (Springmann, Wiebe, *et al.*, 2018). En effet, la viande étant le principal contributeur de protéines, fer, zinc et vitamine B12 dans l'alimentation occidentale, une réduction drastique de sa consommation pourrait entraîner une insécurité nutritionnelle si elle ne s'effectue pas dans un cadre raisonné (Phillips *et al.*, 2015). Alors que la place de la viande dans une alimentation durable fait l'objet de débats sociétaux, le sujet n'a pas été suffisamment exploré scientifiquement par une approche d'analyse systémique.

L'objectif de cette thèse était d'établir et de caractériser les régimes nutritionnellement les plus adaptés à des changements prospectifs de l'alimentation des français dans le sens d'une réduction de la consommation de viande. Pour cela, le premier volet de la thèse était de savoir quels nutriments sont les déterminants les plus importants des régimes alimentaires identifiés par optimisation sur des critères de santé, et nous voulions tester l'hypothèse selon laquelle le fer et le zinc biodisponibles, seraient des nutriments déterminants plutôt que d'autres nutriments. Le deuxième volet avait pour objet de rechercher comment des régimes optimisés obtenus avec des scénarios de réduction de viande pourraient être nutritionnellement sûrs et préservés les autres habitudes alimentaires, afin d'analyser les freins nutritionnels les plus

saillants et les leviers diététiques lors de ces transitions. Enfin, la dernière partie consistait à analyser les répercussions diététiques et nutritionnelles associées à des régimes modélisés, lorsque seule la viande de ruminants est réduite jusqu'à suppression, et d'évaluer les impacts de ces changements prospectifs selon des critères de durabilité environnementale. Les questions de recherche générales sont présentées dans le **Tableau 11**, puis développées et justifiées.

Questions de recherche	Articles scientifiques
<p>Question de recherche 1: Quelles sont les quantités actuelles de fer et de zinc biodisponibles dans les régimes alimentaires occidentaux ? Dans quelle mesure le respect des valeurs de référence pour le fer et le zinc biodisponibles limite notre capacité à identifier des régimes alimentaires plus sains ?</p>	<p>Publication 1: La modélisation de régimes alimentaires plus sains est largement limitée par les valeurs de référence actuelles du fer et du zinc biodisponibles (publié dans <i>l’American Journal of Clinical Nutrition</i>)</p>
<p>Question de recherche 2: Quelles modifications du régime alimentaire devraient être apportées lors de la diminution de la consommation de viande pour maintenir ou améliorer la qualité du régime alimentaire sur des critères de santé ? Quels sont les enjeux nutritionnels les plus saillants ? Quels sont les groupes alimentaires pour lesquels des changements de consommation permettraient de fournir ces nutriments limitants ?</p>	<p>Publication 2: Freins nutritionnels et leviers diététiques lors de la baisse de la consommation de viande : une étude d’optimisation des régimes alimentaires des adultes français (en cours d’évaluation dans <i>Clinical Nutrition</i>)</p>
<p>Question de recherche 3: Dans quelle mesure des régimes contenant de moins en moins de viande de ruminant peuvent être sains et nutritionnellement adéquats, tout en restant compatibles avec les autres habitudes alimentaires ? Quelles sont les répercussions en termes de pressions environnementales associées aux régimes modélisés (par rapport aux régimes observés) ?</p>	<p>Publication 3: Moyens diététiques permettant de réduire et d’éliminer la viande de ruminants dans des régimes sains et nutritionnellement adéquats, et répercussions en termes de pressions environnementales associées aux régimes (soumission prévue dans <i>Journal of Cleaner Production</i>)</p>

Tableau 11. Questions de recherche traitées dans cette thèse et articles scientifiques associés

I.1. Question de recherche n°1 : Modélisation de régimes alimentaires plus sains par rapport aux habitudes alimentaires des français selon différents scénarios de besoins en fer et zinc biodisponibles

Sous-question de recherche n°1.1 : Identification de régimes optimisés sur des critères de santé et d'acceptabilité

Les études en nutrition qui optimisent les régimes alimentaires retiennent souvent le critère de l'acceptabilité culturelle, afin de garantir une diversité en termes de groupes alimentaires proches des régimes observés (Barré *et al.*, 2018; Grasso *et al.*, 2021). Comme développé dans l'introduction bibliographique, le critère de l'acceptabilité culturelle est sujet à controverse puisque certaines hypothèses n'ont pas été vérifiées, comme le fait qu'il soit davantage acceptable de modifier la consommation d'un groupe alimentaire plutôt que celle d'un autre, si ce groupe est caractérisé par une plus forte variabilité de consommation au sein de la population considérée (Kramer, 2016; van Dooren, 2018b). Lorsque ces études prennent en compte l'adéquation nutritionnelle, alors l'atteinte de références nutritionnelles apparaît dans les modèles d'optimisation, soit en tant qu'objectif sous la forme d'une fonction maximisant un indice de qualité de l'apport en nutriments, soit en tant que contraintes. Cependant, encore très peu d'études considèrent un critère de santé plus global qui rende compte des associations entre consommations alimentaires et maladies chroniques, au-delà des risques de carence relatifs à l'adéquation nutritionnelle (Mariotti *et al.*, 2021; Walker *et al.*, 2021). Bien que certains nutriments soient associés à des valeurs santé à long terme (par exemple, des contraintes sur les fibres et la vitamine C peuvent suffire à favoriser les consommations de fruits et légumes dans les régimes modélisés, tandis que des contraintes sur les AGS et le sodium tendent à diminuer implicitement la charcuterie), le critère de santé ou autrement dit d'adhésion à un profil diététique sain, est intéressant en lui-même, car il permet notamment d'avoir recours à certains aliments peu consommés tels que les produits céréaliers complets par exemple, qui sont associés à une réduction du risque de MCV (la consommation de produits céréaliers étant très souvent majoritairement raffinés dans les régimes observés) (De Gavelle *et al.*, 2017; Salomé *et al.*, 2020). Très peu d'études d'optimisation de régimes alimentaires ont évalué l'influence du relâchement de certaines contraintes nutritionnelles, et mené une analyse de sensibilité pour identifier quelles sont celles qui ont le plus d'influence

sur les solutions obtenues (Barré *et al.*, 2018; Perignon, Masset, *et al.*, 2016). Une contrainte limitante (ou active) contribue à conditionner (ou limiter) la valeur de la fonction objectif à l'optimum. L'analyse de sensibilité sur les valeurs de « *duals* » fournis par les algorithmes d'optimisation non linéaire renseigne sur le potentiel d'amélioration de l'objectif, et dans certains cas, l'ajout d'une tolérance sur des contraintes limitantes peut permettre de trouver une meilleure solution au sens de la fonction objectif. L'approche d'optimisation globale sous contraintes qui a été retenue pour les projets 1 à 3 inclura des contraintes nutritionnelles, des objectifs épidémiologiques ainsi que des objectifs de moindre écart à l'observé, à l'aune de ce qui a été produit par l'Anses dans ses derniers travaux visant à actualiser les recommandations du PNNS (Mariotti *et al.*, 2021)(**Figure 17**). Durant cette thèse, nous avons cherché à identifier des régimes alimentaires favorables à la santé au niveau de la population française, tout en cherchant à préserver au mieux les habitudes de consommations actuelles. Pour ce faire, le travail a été conduit à partir des données de consommations des adultes de l'étude nationale INCA3, qui est l'enquête diététique française représentative de la population la plus récente (2014-2015) (Dubuisson *et al.*, 2019). Les régimes modélisés devaient couvrir les références nutritionnelles les plus récentes de l'Anses pour chaque sexe, en tenant compte de la biodisponibilité du fer et du zinc (Anses, 2021). Nous avons décidé de ne pas présenter les résultats en population générale, car les données d'entrée sont très différentes selon le sexe. Par exemple, l'enveloppe énergétique est plus contraignante chez les femmes (la marge est de 200 kcal). Enfin, l'optimisation a été menée en utilisant la procédure OPTMODEL du logiciel SAS® avec le solveur NLP qui est adapté à l'optimisation de fonctions objectifs non-linéaires sous contraintes non-linéaires, et qui présente l'avantage de fournir les valeurs de « *duals* » associées aux contraintes et donc de renseigner sur leur caractère plus ou moins limitant.

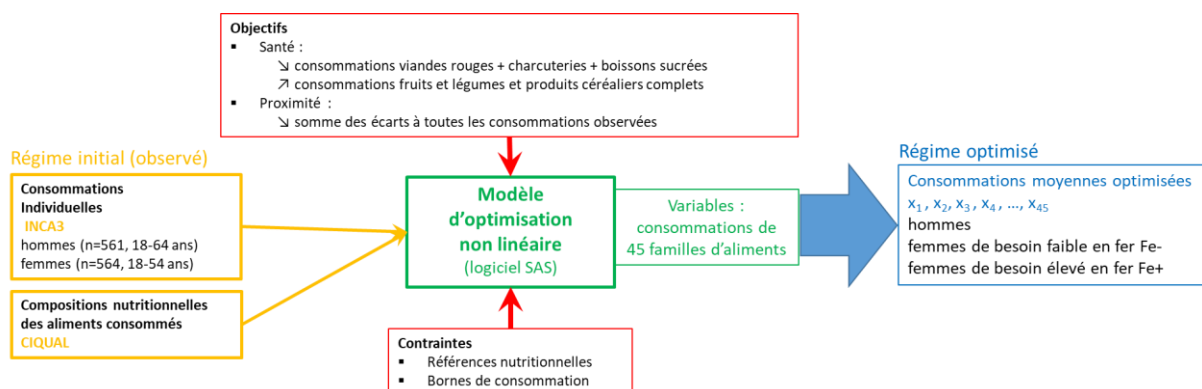


Figure 17. Problème d'optimisation multi-critères, sous contraintes

Sous-question de recherche n°1.2 : Flexibilité sur les besoins estimés en fer et zinc biodisponibles et impact sur la santé

Les régimes occidentaux, qui reposent davantage sur des sources animales, ont tendance à favoriser un meilleur statut nutritionnel en ce qui concerne l'iode, la vitamine B12, le calcium, le fer et le zinc (Phillips *et al.*, 2015). Cependant, les régimes occidentaux contribuent largement à la charge de morbidité (Afshin *et al.*, 2019). Les régimes alimentaires plus sains, tels que ceux qui sous-tendent les directives alimentaires ou les scénarios prospectifs pour la santé humaine et planétaire, sont plus riches en végétaux et moins riches en produits animaux, et ils sont censés garantir l'adéquation des nutriments (Willett *et al.*, 2019; Trichopoulou *et al.*, 2014). On a pu documenter, dans l'introduction, que la végétalisation des régimes occidentaux était *a priori* durable, mais qu'elle pouvait amener à des déséquilibres nutritionnels. Malgré une littérature riche sur les questions de sécurité nutritionnelle dans le cadre d'une végétalisation de l'alimentation, très peu d'études considèrent la biodisponibilité des nutriments (Barré *et al.*, 2018; Perignon, Barré, *et al.*, 2016), et les variations de la biodisponibilité du fer et du zinc induites par des modifications des régimes alimentaires modélisés n'ont pas été étudiées avec précision. L'adéquation en fer et en zinc dépend en grande partie des niveaux de consommations des produits animaux et végétaux dans les régimes alimentaires. Comme nous l'avons vu dans le premier chapitre, les personnes consommant des régimes riches en produits végétaux ont des besoins alimentaires plus importants en fer et en zinc (Hallberg *et al.*, 1989; Phillips *et al.*, 2015). À notre connaissance, presque aucune étude interventionnelle n'a étudié les impacts d'une végétalisation sur le statut en fer ou en zinc, et nos connaissances sont fondées sur la modélisation (Jennings *et al.*, 2020). Les études de modélisation de régimes alimentaires plus sains utilisent généralement des coefficients d'absorption constants pour le fer et le zinc (Collings *et al.*, 2013; Dietary Guidelines Advisory Committee, 2020; Mariotti *et al.*, 2021) et tiennent rarement compte des variations des effets sur leur biodisponibilité induites par les changements alimentaires par rapport aux régimes modélisés (Barré *et al.*, 2018). Des apports plus faibles en fer et en zinc résultant d'une consommation plus faible de viande (en particulier de viande rouge) et des apports plus élevés en phytates résultant d'une consommation plus importante de produits d'origine végétale (en particulier de céréales complètes) se traduisent

par une faible biodisponibilité du fer et du zinc dans les régimes modélisés (Armah *et al.*, 2013).

De plus, il existe des incertitudes lors de l'élaboration des valeurs de référence pour le fer et le zinc. En effet, en France, la détermination du besoin en fer est en fait basée sur la quantité permettant l'équilibre en fer (Anses, 2021). Or, il existe des incertitudes dans le calcul, parce que les pertes en fer sont variables mais aussi et surtout parce que l'absorption du fer est appréciée de façon assez approximative alors qu'elle dépend de nombreux composants alimentaires (Miller *et al.*, 2013). La situation est singulièrement compliquée par le fait que l'absorption du fer dépend principalement du statut en fer. Ce point de vue est partagé par de nombreux auteurs, dont par exemple le Scientific Advisory Committee on Nutrition (SACN) en Grande-Bretagne, qui a écrit que " les proportions élevées de la population britannique dont les apports sont inférieurs à l'apport nutritionnel minimal de référence (LRNI) et la prévalence relativement faible de l'anémie ferriprive suggèrent que les RNP pour le fer sont peut-être trop élevées " (SACN, 2010).

Dans le **projet n°1**, nous avons estimé les quantités de fer et de zinc biodisponibles dans les régimes alimentaires d'un échantillon de référence d'une population adulte dans un pays occidental. Pour ce faire, nous avons utilisé plusieurs équations de biodisponibilité (Armah *et al.*, 2013; Hallberg and Hulthén, 2000; Miller *et al.*, 2007; EFSA, 2014) et complété la base de données du Centre d'information sur la qualité des aliments (CIQUAL) avec les teneurs en phytates des aliments à partir des données issues de la thèse du Dr. Amirabdollahian (Amirabdollahian, 2008). Le **projet n°1** explore également la façon dont les valeurs de référence actuelles en matière d'apports en fer et en zinc affectent la modélisation de régimes alimentaires sains. Dans la population française, la prévalence d'un apport inadéquat en fer est beaucoup plus élevée que la prévalence de l'anémie ferriprive, ce qui implique que les références actuelles sont peut-être trop protectrices. Cette prémisse a permis le développement d'un scénario flexible avec des besoins en fer plus souples, qui devrait fournir des informations utiles pour améliorer les choix alimentaires et éventuellement réduire la charge de morbidité. Les méthodes employées et résultats obtenus sont détaillés dans le **projet n°1**.

Sous-question de recherche n°1.3 : Impact sur le risque lié à l'anémie ferriprive et les morts prématurées évitées

Comme évoqué dans l'introduction bibliographique, les déficits en fer qui sont à l'origine de la moitié des cas d'anémie constituent l'un des troubles nutritionnels majeurs dans le monde (Camaschella, 2015; Griffin and Rogido, 2021; SACN, 2010). Dans le **projet n°1**, nous avons choisi de considérer les consommations alimentaires et les apports en nutriments des hommes et des femmes, en distinguant deux sous-populations chez les femmes. La RNP pour des femmes ayant des pertes menstruelles faibles ou normales (80% de la population) a été fixée à 11 mg/j, tandis que la RNP pour les femmes ayant des pertes menstruelles élevées a été fixée à 16 mg/j correspondant à la référence populationnelle proposée par l'EFSA (Mariotti *et al.*, 2021). Pour des raisons de sécurité, dans les scénarios avec flexibilité, de nouvelles valeurs seuils inférieures pour le zinc et le fer biodisponibles ont été introduites comme contraintes. Dans le **projet n°1**, nous avons émis l'hypothèse qu'une réduction marquée de la viande rouge et une forte augmentation des céréales complètes impliqueraient une diminution du fer et du zinc biodisponibles, et il a fallu développer une méthode pour discuter l'acceptation d'un risque accru d'anémie ferriprive. On peut penser qu'un risque accru d'anémie ferriprive serait acceptable dans la mesure où ce risque serait largement compensé par le gain en maladies chroniques, d'autant plus que c'est un risque gérable car l'anémie ferriprive se détecte et se traite sur une base individuelle, et elle pourrait également être évitée par une supplémentation alimentaire au niveau de la population (Das *et al.*, 2019). Autrement dit, ce risque pourrait être jugé approprié s'il est compensé par l'avantage manifeste d'un régime alimentaire plus sain. Ainsi, dans le **projet n°1**, nous avons décidé d'utiliser une approche d'évaluation comparative des risques, afin de projeter les résultats en termes de fardeau de santé, afin d'analyser dans quelle mesure la flexibilité sur les quantités de fer dans les régimes modélisés induirait une prévalence légèrement plus élevée de l'anémie ferriprive, et comment cette charge en termes de santé se comparerait au gain d'années de vie en bonne santé provenant de l'amélioration du régime dans l'ensemble de la population adulte.

Cette comparaison de perte et de gain en termes de santé peut être faite en utilisant une métrique commune, celle des DALYs. Pour évaluer l'évolution attendue de la prévalence de l'anémie à différents niveaux d'apports en fer, nous pouvons utiliser la méthode classique

d'évaluation du statut selon une approche probabiliste, puis converti les changements dans la prévalence de l'anémie en DALYs (www.who.int/healthinfo). En vis-à-vis, les modèles d'évaluation du risque de survenue de pathologies chroniques (maladies coronariennes, AVC, diabète de type 2, et cancer colorectal), opérationnalisés dans l'équipe avec le modèle EpiDiet ont permis d'exprimer en DALYs les différences de morbidité et de mortalité prématurée induites par les scénarios de modifications du comportement alimentaire (Schwingshackl *et al.*, 2019).

I.2. Question de recherche n°2 : Modélisation de transitions de baisse graduelle de la viande selon des objectifs de santé, tout en améliorant l'adéquation nutritionnelle et en préservant au mieux les autres habitudes alimentaires

Sous-question de recherche n°2.1 : Baisse graduelle de la viande totale

Selon la FAO, les régimes alimentaires durables contribuent à protéger et à respecter la biodiversité et les écosystèmes, sont économiquement équitables et accessibles, abordables, nutritionnellement sûrs et sains, et permettent d'optimiser les ressources naturelles et humaines – mais ils sont aussi «culturellement acceptables» (FAO, 2010). Dans l'analyse de la durabilité des régimes, et notamment dans l'élaboration de régimes optimaux, on tient souvent compte de l'acceptabilité culturelle en concevant des régimes qui s'éloignent peu (ou le moins possible) de l'existant (Barré *et al.*, 2018; Grasso *et al.*, 2021; Mariotti *et al.*, 2021). Ces modèles présentent donc une grande inertie puisqu'ils sont fortement contraints par la consommation passée (telle que relevée dans l'enquête alimentaire) et les modes de consommation dominants. Ils sont utiles pour élaborer des standards classiques de consommation moyenne, mais ils ne sont pas adaptés à l'accompagnement du changement d'attitude d'une partie de la population, ni à la prospective en termes de transitions alimentaires des populations. Par exemple, en France, le travail de modélisation mené à l'Anses a permis de définir des régimes optimaux qui respectent les contraintes nutritionnelles (couverture des références nutritionnelles), suivent les objectifs de santé publique (minimisation de la consommation de viande rouge, charcuterie, et boissons sucrées, maximisation de la consommation de fruits, légumes et céréales complètes), tout en s'éloignant le moins possible des consommations observées par ailleurs (Mariotti *et al.*, 2021).

Une partie non négligeable de la population diminue ou envisage de diminuer sa consommation de viande pour diverses raisons (de Gavelle, Davidenko, *et al.*, 2019) et par conséquent, les régimes alimentaires flexitariens apparaissent comme des objets d'étude pertinents. Néanmoins, il n'existe pas de prospective sur les caractéristiques des régimes nutritionnellement adéquats que pourraient adopter la plupart de la population à l'horizon d'une transition alimentaire qui verrait le flexitarisme devenir majoritaire en Europe – un horizon qu'on peut envisager vers 2040-2050 (*European Commission*, 2019). Les changements de l'alimentation relevant d'une transition profonde, comme une révision de la nature des sources protéiques, doivent être étudiés par des projections à distance du régime actuellement prévalent. Ils ne peuvent pas être bien appréhendés en partant par l'autre côté du spectre, c'est-à-dire les végétariens, car la population correspond à une typologie de consommation et de consommateurs trop différente (*FranceAgrimer / IFOP*, 2021). Comme détaillé dans l'introduction bibliographique, la diminution de la consommation de viande dans les pays à hauts revenus ces dernières années s'est accompagnée d'une faible augmentation du pourcentage de végétariens, mais d'un développement important de profils intermédiaires basés sur une consommation modérée de viandes (Brunin *et al.*, 2022; Vieux *et al.*, 2012). Par ailleurs, la réduction des émissions de GES pour des régimes nutritionnellement adéquats implique la diminution drastique de la consommation de viande de ruminant (Stylianou *et al.*, 2021; Wilson *et al.*, 2019), alors que la consommation de viande est davantage préservée dans les régimes optimisés quand on cherche à ne pas trop s'éloigner des régimes actuels (de Gavelle *et al.*, 2018; Mariotti *et al.*, 2021). Il est donc nécessaire de conduire l'analyse en s'éloignant davantage de la situation actuelle pour pouvoir comprendre les déterminants nutritionnels et diététiques associés à des diminutions plus importantes de la consommation de viande. Les régimes semi-végétariens sont souvent décrits dans des études observationnelles (Allès *et al.*, 2017; Sobiecki *et al.*, 2016), où l'adéquation nutritionnelle n'est pas une condition fixée d'emblée. Aussi, les simulations de substitutions de la viande par des analogues végétaux se font souvent sans permettre une réorganisation de l'ensemble du régime alimentaire (Gazan *et al.*, 2021; Salomé, Huneau, *et al.*, 2021). Compte tenu de la tendance actuelle à réduire la consommation de viande et de la rareté des données dans la littérature permettant d'évaluer rigoureusement les caractéristiques alimentaires des régimes pauvres en viande ou sans viande qui les rendraient nutritionnellement adéquats, des données sont nécessaires pour comprendre quelles modifications du régime alimentaire,

aussi proches que possible des autres habitudes alimentaires, doivent être apportées lors de la diminution de la consommation de viande pour maintenir ou améliorer la qualité du régime alimentaire (Conrad *et al.*, 2017; Gehring *et al.*, 2021; Hemler and Hu, 2019b; Satija *et al.*, 2017; Sawicki *et al.*, 2021). Une question différente de celles étudiées précédemment émerge donc au-delà de l'identification de régimes visant uniquement à améliorer l'adéquation nutritionnelle et le suivi des recommandations alimentaires : si les individus ont la volonté de réduire leur consommation de viande, ce qui semble être la tendance ces dernières années, quelles sont les régimes optimisés selon des scénarios gradués de diminution de la consommation de viande améliorant le plus l'adéquation nutritionnelle qui vont dans le sens de ces transitions diététiques ? Dans le **projet n°2**, une analyse prospective des régimes flexitariens est élaborée, pour déterminer quelles sont les caractéristiques diététiques des régimes nutritionnellement adéquats, quels en sont les éléments qui limitent la sécurité nutritionnelle et rendent ainsi ces régimes difficiles à identifier, et quelles solutions on peut proposer, notamment en termes de groupes d'aliments qui pourrait être des leviers pour palier à l'insécurité nutritionnelle.

Nous aurions pu réduire uniquement les viandes les plus grasses, car quand la diminution totale de viande n'est pas drastique, des substitutions de la viande rouge (principalement, bœuf, veau, mouton, agneau, porc) pour la volaille pourraient être avantageuses sur plusieurs indicateurs (Kim *et al.*, 2017; Papier *et al.*, 2021). Par exemple, dans notre étude basée sur les consommations individuelles de l'enquête INCA3, la viande de porc est plus riche en AGS (5 g/100g) que la volaille (1,5 g/100g). Cette approche n'a cependant pas été retenue, car pour reprendre l'exemple du groupe « Porc », on recense des pièces plus ou moins grasses (côte de porc/filet de porc) au sein même du groupe, et il aurait fallu éclater la classification des principaux groupes de produits carnés en items alimentaires ou pièces bouchères selon les teneurs en nutriments, ce qui aurait eu l'inconvénient d'être moins facile à représenter d'un point de vue diététique. Par ailleurs, les repères de consommation (sur lesquels repose le pilotage par l'objectif Santé dans notre modèle) portent sur des grandes catégories (viande rouge et charcuterie, en ce qui concerne les viandes).

Sous-question de recherche n°2.2 : Analyse des freins nutritionnels et des leviers diététiques

Les produits carnés et les sources végétales de protéines ont des profils nutritionnels complètement différents, et leur substituabilité doit donc être étudiée dans le cadre des modèles diététiques complexes de leur apport (Gardner *et al.*, 2019). La viande et surtout les abats sont des sources importantes de protéines et d'AAI (Wyness *et al.*, 2011) et fournissent des minéraux et des vitamines essentiels tels que le fer, le zinc, le sélénium et les vitamines A, B6 et B12, pour lesquels des apports insuffisants et/ou des carences ont été documentés chez les adultes (EFSA, 2017; Anses, 2021; WHO, FAO, 2005; Salomé, Kesse-Guyot, *et al.*, 2021). Il peut donc être difficile de respecter les valeurs nutritionnelles de référence avec un régime contenant moins de viande pour un certain nombre de ces nutriments (Mariotti *et al.*, 2021). Le **projet n°2** avait pour objectif de mener une analyse claire et détaillée de l'importance de la viande dans les régimes alimentaires sains, en mettant en évidence les problèmes de nutriments (pour un vaste panel de nutriments considérés) et les solutions diététiques lors de la réduction de la viande. Pour pouvoir prendre en compte la qualité des protéines, il a fallu obtenir la composition en AA des différents aliments étudiés. Ces données n'étant pas disponibles dans la base de données du CIQUAL en France, une base de donnée de composition en AA a été développée à partir des données françaises collectées sur la viande (Centre d'Information des Viandes & INRAE, 2006) et des données analytiques de bases de données des agences sanitaires des Etats-Unis, du Canada, du Japon et de Nouvelle-Zélande (Perraud *et al.*, communication personnelle). De plus, la digestibilité des protéines étant légèrement différente entre sources de protéines animales et végétales, il a fallu prendre en compte cette différence. Les protéines végétales étant en moyenne 5% moins digestibles que les protéines animales (en compilant les études de digestibilité iléale chez l'Homme), nous avons décidé d'appliquer une pénalité de 5% aux apports protéiques provenant de sources végétales (De Gavelle *et al.*, 2017). La prise en compte des différences de profils en AA et digestibilité des protéines a été développée dans le **projet n°2**.

I.3. Question de recherche n°3 : Modélisation de transitions de baisse graduelle de la viande de ruminants et impacts environnementaux

L'introduction bibliographique nous a permis d'identifier que la viande, mais surtout la viande de ruminant (principalement bœuf, veau, mouton, agneau), est reconnue comme un

contributeur très important aux émissions de GES associées à l'alimentation (Poore and Nemecek, 2018). Après avoir évalué des modèles emboîtés imposant un gradient de contrainte sur la consommation de viande totale, il a semblé pertinent de poursuivre l'étude en ciblant spécifiquement une réduction de la viande de ruminants, ainsi que de tester la possible importance d'un lien de coproduction (viande de ruminants/lait), et d'évaluer en étude d'impact les répercussions des évolutions de régimes sur le volet environnemental.

Bien que peu d'études dans la littérature ont évalué les caractéristiques diététiques des régimes à faible teneurs en viande de ruminants qui les rendent nutritionnellement adéquats dans le contexte d'une éventuelle restructuration globale de l'alimentation, les études de modélisation convergent toutes pour conclure que la réduction de la consommation globale de viande serait tout à fait cohérente avec certains régimes modélisés dans le cadre de travaux d'optimisation visant à définir des régimes ayant un impact environnemental moindre (Kesse-Guyot, Fouillet, *et al.*, 2021; Kramer *et al.*, 2017; Macdiarmid *et al.*, 2012). Les méthodes et les résultats sur les transitions à adopter pour améliorer le profil diététique des régimes en ne réduisant que la consommation de viandes de ruminants sont décrits dans le **projet n°3**.

Les transitions de baisse graduelle de la viande de ruminants ont conduit par construction à des régimes modélisés où toute la viande de ruminants a été supprimée à l'étape finale. En étude d'impact, nous avons cherché à décrire l'évolution des pressions environnementales (émissions de GES, utilisation des terres, ressources en eau, demande énergétique) associées aux régimes modélisés (par rapport aux régimes observés) afin de quantifier l'amélioration en termes de durabilité environnementale qui pourrait être obtenue en réduisant la viande de ruminants. Au-delà de l'aspect de la sécurité nutritionnelle, l'alimentation est aussi étudiée en tant que facteur d'exposition aux contaminants, mais seul les paramètres environnementaux ont été étudiés en impact.

Concernant les émissions de GES en particulier, les évolutions de pressions associées aux régimes modélisés avec baisse de la consommation de viande de ruminants peuvent différer en utilisant la base française Agribalyse (Colomb *et al.*, 2015) complétée par la base Sharp (données « Assiette ») (Mertens *et al.*, 2019) par rapport aux publications antérieures qui utilisent d'autres bases de données pour faire l'évaluation d'impact telle que la base Dialecte (données « Sortie de ferme ») (Pointereau *et al.*, 2012). Les analyses de cycle de vie (ACV) pouvant varier d'une étude à l'autre (conditions d'élevage, rôle du jeu des allocations), une

étude comparative visant à estimer les incertitudes associées à l'utilisation de la base Agribalyse dans le **projet n°3** est présentée au chapitre 3 du présent manuscrit de thèse.

II. Projets de thèse

Les projets effectués pendant cette thèse sont présentés dans cette partie. Le **projet n°1**, qui a été publié, sera présenté dans le format dans lequel il a été publié, précédé d'un résumé en français. Les **projets n°2 et 3** seront présentés dans le format dans lequel ils ont été soumis, précédés d'un résumé en français.

II.1. Projet n°1 : La modélisation de régimes alimentaires plus sains est largement limitée par les valeurs de référence actuelles du fer et du zinc biodisponibles

a. Résumé

Contexte : Les régimes occidentaux, qui reposent davantage sur des sources animales, favorisent un meilleur statut nutritionnel, notamment en ce qui concerne le fer et le zinc. Cependant, les régimes occidentaux actuels contribuent largement à la charge de morbidité. Des régimes alimentaires plus sains ont été identifiés par différentes approches, notamment des régimes historiques tels que le régime méditerranéen. Tous ces régimes sont plus pauvres en viande rouge et en charcuterie et plus riches en produits céréaliers complets, en légumineuses, en noix, en fruits et en légumes. Ils auraient donc tendance à réduire le fer et le zinc biodisponibles en diminuant à la fois l'apport en fer hémique et en zinc et les coefficients d'absorption de fer non hémique et de zinc en raison d'une teneur plus élevée en phytates. Cependant, les biodisponibilités du fer et du zinc sont rarement prises en compte lors de la modélisation de régimes alimentaires plus sains. En outre, il existe des incertitudes concernant les besoins nets en fer et en zinc, en raison de l'absence de paramètres précis ou de marqueurs intermédiaires et de la grande variabilité des pertes en fer. Les valeurs de référence utilisées pour le fer et le zinc biodisponibles pourraient être surprotectrices et donc trop contraignantes lorsqu'elles sont prises comme contraintes pour définir ou évaluer des régimes alimentaires sains.

Objectifs : Dans cette étude, nous avons estimé les quantités de fer et de zinc biodisponibles dans les régimes alimentaires d'un échantillon de référence de la population française et utilisé l'optimisation multi-critères pour modéliser des régimes alimentaires sains afin de tester l'hypothèse selon laquelle le fer et le zinc, plutôt que d'autres nutriments, sont des déterminants importants des régimes alimentaires sains optimisés.

Méthodes :

Données d'entrée utilisées pour la modélisation du régime

Nous avons utilisé les données de consommation alimentaire des hommes ($n = 564$, 18-64 ans) et des femmes pré-ménopausées ($n = 561$, 18-54 ans) classés comme non déclarants dans l'étude nationale française INCA3 menée en 2014-2015. Le mode opératoire de l'enquête INCA3 est présenté en **annexe 1**. Les apports en nutriments ont été calculés à l'aide de la base de données de composition nutritionnelle de 2016 du CIQUAL.

Optimisation multi-critères du régime alimentaire

Un programme d'optimisation multi-objectif, non linéaire et sous contraintes a été développé à l'aide de la procédure optmodel du logiciel SAS[®]. Les variables de décision étaient les consommations quotidiennes moyennes des 45 groupes d'aliments (**annexe 2**). Nous avons considéré la population des hommes et celle des femmes, que nous avons dupliquées en deux sous-populations selon le niveau de besoin en fer, en distinguant les femmes de besoin en fer bas (femmes Fe-) ou élevé (femmes Fe+). L'optimisation consistait à maximiser la qualité sanitaire du régime modélisé tout en minimisant son écart avec le régime actuel.

Contraintes nutritionnelles

Les contraintes nutritionnelles consistaient en un large ensemble de contraintes nutritionnelles pour s'assurer que toutes les références nutritionnelles étaient couvertes, ainsi que quelques contraintes diététiques pour suivre les recommandations alimentaires sur certains groupes d'aliments.

Modèles d'optimisation sans ou avec flexibilité sur les contraintes nutritionnelles pour le zinc et le fer

Nous avons utilisé un modèle d'optimisation standard (non-flexible, NFlex) et un modèle alternatif permettant une flexibilité sur le fer et le zinc biodisponibles (flexible, Flex) qui ont été identifiés comme les contraintes nutritionnelles les plus contraignantes dans le modèle

standard. Ce modèle d'optimisation alternatif a été développé avec une programmation par objectifs, au lieu de contraintes strictes, sur ces apports en nutriments afin d'étudier comment les besoins estimés en fer et en zinc biodisponibles déterminent et influencent la composition des régimes modélisés.

Caractériser l'impact attendu des régimes alimentaires modélisés sur la santé

Dans cette thèse, nous avons mis en place le modèle EpiDiet en utilisant les valeurs rapportées dans une série de méta-analyses internationales validées publiées par une équipe européenne (Schwingshackl *et al.*, 2019). Nous avons sélectionné 12 groupes alimentaires (produits céréaliers complets, produits céréaliers raffinés, légumes, fruits, noix, légumineuses, œufs, produits laitiers, poisson, viande rouge, viande transformée, et boissons sucrées) et 4 maladies liées au régime alimentaire (maladies coronariennes, AVC, diabète de type 2, et cancer colorectal). Ce modèle a permis d'évaluer les avantages sanitaires des régimes modélisés dans chaque contexte d'optimisation (NFlex et Flex), en évaluant les changements attendus dans les taux de mortalité, les risques de maladies chroniques et la charge de morbidité comme le nombre d'années de vie perdues évitées qui résulteraient du remplacement du régime observé par le régime modélisé considéré. Nous avons également évalué les changements de la prévalence de l'anémie ferriprive qui seraient attribuables aux changements du fer biodisponible dans les régimes modélisés.

Résultats : Quelle que soit la population, les contraintes les plus limitantes ayant le plus d'impact sur la composition des régimes modélisés selon l'option standard étaient les contraintes en fer et en zinc biodisponibles.

Dans le modèle d'optimisation alternatif (Flex), la flexibilité a été introduite simultanément sur les contraintes sur le fer et le zinc biodisponibles en raison de leur interdépendance. Par rapport aux régimes observés et aux régimes modélisés par NFlex, les régimes modélisés par Flex contenaient moins de viande, et en particulier moins de viande rouge, et plus de produits céréaliers, et en particulier plus de produits céréaliers complets. Par rapport à NFlex, l'option de modélisation Flex a effectivement permis de réduire la viande rouge (-87% à -91% par rapport à l'observé, c'est-à-dire avec une réduction massive et similaire quelle que soit la population), et d'augmenter encore davantage les produits céréaliers complets.

Par rapport à l'option NFlex, l'option Flex a donc donné lieu à un meilleur critère de santé ainsi qu'à un critère d'écart de régime plus faible, étant donné que moins de changements alimentaires ont été nécessaires pour assurer des apports en zinc et fer biodisponibles convenables avec une pression qui a été allégée par construction entre les valeurs de référence des nutriments et les seuils de carence, autrement dit, l'optimisation en tolérant une certaine flexibilité signifie que les apports en fer et zinc biodisponibles peuvent descendre en dessous des références, mais de manière limitée et sans atteindre les seuils carenciels. Dans les régimes modélisés par Flex, par rapport aux valeurs de référence, les apports en zinc et fer biodisponibles étaient respectivement diminués de 20% et 30% par rapport à leurs valeurs de référence chez les hommes, de 14% et 37% chez les femmes Fe- et de 14% et 57% chez les femmes Fe+.

Estimation des changements dans la charge de morbidité résultant de régimes alimentaires modélisés

Nous avons estimé que la réduction du risque de mortalité due aux maladies cérébrovasculaires, aux cardiopathies ischémiques, au diabète et au cancer colorectal serait de 22% chez les hommes et de 15% chez les femmes avec les régimes modélisés par NFlex. Par rapport à l'option NFlex, l'option Flex a entraîné une diminution supplémentaire de la charge de ces maladies de 19% chez les hommes et de 70% chez les femmes. En revanche, cet assouplissement des objectifs pour le fer et le zinc entraînerait également une augmentation de la prévalence de l'anémie ferriprive, qui passerait de 0,2% actuellement à 3% chez les hommes et de 4% actuellement à 7% chez les femmes.

Globalement, en tenant compte de toutes les maladies chroniques et de l'anémie et en moyenne sur l'ensemble de la population, l'option Flex a entraîné une diminution supplémentaire de 18% de la charge de morbidité par rapport à l'option NFlex. La réduction attendue de la mortalité et de la charge de morbidité dans les régimes modélisés par Flex par rapport aux régimes modélisés par NFlex a été principalement attribuable à la diminution de la viande rouge.

Conclusion : Notre étude a révélé un conflit entre la couverture des estimations actuelles des besoins en fer et en zinc, en tenant compte de leur biodisponibilité, et la mise en place d'une alimentation saine. Nous avons en effet montré, tant chez les hommes que chez les femmes,

que la sécurisation des apports en fer et en zinc exclut la réduction de la viande rouge et limite l'augmentation des produits céréaliers complets, alors que ces deux objectifs peuvent être atteints en autorisant une certaine flexibilité sur les valeurs de référence actuelles du fer et du zinc biodisponibles.

Valorisation : Ce travail a été publié dans la revue *The American Journal of Clinical Nutrition* (Volume 115, n°3) le 13 novembre 2021.

b. Messages-clés

Messages-clés

- Le fer et le zinc biodisponibles ont été identifiés comme les nutriments les plus limitants lors de l'optimisation, et nous avons alors mis en œuvre deux scénarios, soit sans flexibilité sur le fer et le zinc biodisponibles (NFlex), soit avec une certaine flexibilité (Flex).
- Seul le scénario Flex a permis de réduire considérablement la viande rouge et d'augmenter encore davantage les céréales complètes.
- En projetant ces résultats en décès prématurés évités à l'aide d'un modèle d'évaluation comparative des risques, nous avons pu montrer que la flexibilité induirait une prévalence légèrement plus élevée de l'anémie ferriprive mais qu'elle permettrait un plus fort gain net final d'année de vie en bonne santé dans l'ensemble de la population adulte.
- Les besoins actuels estimés en fer et en zinc biodisponibles contraignent la modélisation de régimes alimentaires plus sains.
- Considérer des références plus basses permet d'identifier des régimes apparemment plus sains.

c. Article et données supplémentaires

Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc—a diet optimization study in French adults

Alison Dussiot,¹ H el ene Fouillet,¹ Juhui Wang,¹ Marion Salom e,¹ Jean-François Huneau,¹ Emmanuelle Kesse-Guyot,² and François Mariotti¹

¹Universit  Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France; and ²Sorbonne Paris Nord University, Inserm, INRAE, Cnam, Nutritional Epidemiology Research Team (EREN), Epidemiology and Statistics Research Center—University of Paris (CRESS), 93017, Bobigny, France

ABSTRACT

Background: Healthier dietary patterns involve more plant-based foods than current Western diets rich in animal products containing high amounts of bioavailable iron and zinc. Little consideration is given to the bioavailability of iron and zinc when studying healthy eating patterns.

Objectives: Our aim was to determine whether currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc limit the identification of healthier dietary patterns.

Methods: Using dietary data from a representative French survey and multicriteria nonlinear optimization, we identified diets that maximize health criteria based on food-based dietary guidelines and concomitantly depart only minimally from the observed diet while complying with all nutrient reference values either strictly (nonflexible optimization) or by allowing bioavailable iron and zinc below the current reference values, but to a limited extent (flexible optimization). Using a comparative risk assessment model, we estimated the resulting impact on cardiometabolic and colorectal cancer mortality/morbidity and changes to iron-deficiency anemia.

Results: Under nonflexible optimization, reference values for bioavailable iron and zinc were the most binding of the 35 nutrient constraints, and modeled diets displayed considerable redistributions within grains and meat. With flexible optimization, modeled diets were healthier as they contained less red meat and more whole-grain products, but would increase iron-deficiency anemia to 5.0% (95% CI: 3.9%, 6.4%). Globally, in terms of disability adjusted life years (DALYs), as the loss due to anemia would represent <30% of the gain otherwise made on chronic diseases, adding flexibility in the iron and zinc reference values would result in a further 18% decrease in the disease burden from 84,768 [95% uncertainty interval (UI): 81,066, 88,470] to 99,689 (95% UI: 95,787, 103,591) DALYs averted.

Conclusions: Currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc proved to be critical factors when modeling healthy eating patterns. Considering lower reference values enables the identification of diets that are apparently healthier overall. *Am J Clin Nutr* 2021;00:1–12.

Keywords: diet optimization, healthy diet, dietary requirements, dietary patterns, iron and zinc bioavailability

Introduction

Nutritional adequacy depends on both the intake of nutrients and their bioavailability, the latter defined as the proportion of the ingested nutrient that is made available for use in normal functions (1). The absorption of nonheme iron and zinc, in particular, can vary as a function of many physiological and dietary factors. Phytate is known to inhibit both the absorption of nonheme iron and zinc (2–4), so that individuals consuming phytate-rich diets, high in plant products, have a greater dietary requirement for iron and zinc (3, 5). The intakes of many nutrients and their status vary largely as a function of the type of dietary pattern, and Western diets that are more reliant on animal sources tend towards a better nutritional status regarding iodine, vitamin B12, calcium, iron, and zinc (5).

However, current Western diets are making a major contribution to the burden of disease (6). Healthier dietary patterns have been identified using different approaches, including historical

The authors reported no funding received for this study.

Supplemental Tables 1–8, Supplemental Methods, and Supplemental Figures 1–2 are available from the “Supplementary data” link in the online posting of the article and from the same link in the online table of contents at <https://academic.oup.com/ajcn/>.

Address correspondence to FM (email: francois.mariotti@agroparis-tech.fr).

Abbreviations used: ANSES, French Agency for Food, Environmental, and Occupational Health and Safety; DALYs, disability-adjusted life years; FB DG, food-based dietary guidelines; Flex, flexible model; NFlex, nonflexible model.

Received June 25, 2021. Accepted for publication November 5, 2021.

First published online November 13, 2021; doi: <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab373>.

diets such as the Mediterranean diet (7), modeled Healthy Eating Patterns underlying Food-Based Dietary Guidelines (FBDG) (7–9) or prospective scenarios for human and planetary health (10, 11). All of these diets contain less red and processed meats and more whole grains, pulses (including dry peas, chickpeas, beans and lentils), nuts, fruit, and vegetables. These diets would therefore tend to reduce bioavailable iron and zinc by reducing the intake of both zinc and heme iron and the absorption of zinc and nonheme iron because of higher phytate. To our knowledge, almost no previous interventional trials have studied iron or zinc status, and our knowledge is based on modeling (12).

Studies modeling healthier diets generally use constant absorption coefficients for iron and zinc (8, 10, 13) and seldom take account of variations in effects on their bioavailability induced by dietary changes to modeled diets (14). Furthermore, uncertainties remain regarding the physiological requirements for iron and zinc because of a lack of accurate endpoints or intermediate markers and the considerable variability seen regarding iron requirements, particularly among menstruating females. For instance, the population reference intake for menstruating females (i.e., the amount of iron that covers the requirements of 95% of females) is ~50% higher than that needed to cover the requirements of 80% of females (10). Furthermore, the prevalence of people with insufficient iron intake compared with the estimated requirement is much higher than the actual prevalence of iron-deficiency anemia, and the clinical impact of insufficient zinc intake has not been well characterized in adults. The reference values used for iron and zinc might therefore be overprotective and thus excessively constraining when defining or assessing healthy dietary patterns.

During this study, we estimated the amounts of bioavailable iron and zinc in the diets of a reference sample of an adult population in France with background intakes and reference values for iron and zinc similar to those of other Western countries (15). We then used multicriteria optimization to model healthy eating patterns in order to test the hypothesis that iron and zinc, rather than other nutrients, are important determinants of optimized healthy eating patterns. We then determined whether, and to what extent, meeting iron and zinc reference values limited our ability to identify healthier diets.

Methods

Input data used for diet modeling

We used food consumption data for male subjects ($n = 564$, 18–64 y old) and premenopausal female subjects ($n = 561$, 18–54 y old) classified as non-underreporters in the French INCA3 national study conducted in 2014–2015. The survey design and methods have been described in full elsewhere (16, 17). The sociodemographic characteristics and lifestyles of the study population are presented in Table 1. Briefly, food and beverage intake were assessed using 3 unplanned nonconsecutive 24-h dietary recalls collected by trained interviewers and assisted by dietary software. Portion sizes were estimated using validated photographs (16). Nutrient intake was calculated using the 2016 nutritional composition database from the French *Centre d'Information sur la Qualité des Aliments* (18). Food items ($n = 1533$) were categorized into

TABLE 1 Lifestyle and sociodemographic characteristics of the sample of adults ($n = 1125$) extracted from the French national INCA 3 study, 2014–2015¹

	Males ($n = 564$)	Females ($n = 561$)
Age, y		
<25	9%	8%
25–35	16%	25%
35–50	38%	52%
50–65	37%	15%
Education level		
<High school diploma	34%	23%
High school diploma	21%	21%
Postsecondary graduation	44%	56%
BMI		
<18.5	2%	4%
18.5–25	49%	59%
>25–30	38%	24%
>30	11%	12%
Alcohol consumption		
Nondrinker	30%	54%
Moderate drinker ²	70%	46%
Heavy drinker	—	—

¹INCA 3, Etude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 3.

²<20g/d for females and <30 g/d for males.

45 food groups (10) (Supplemental Table 1). In each food group, the nutrient composition (for 41 nutrients) was calculated as a composite composition by gender, being the average nutrient composition of the group food items weighted by their average gender-specific population intake. Using three 24-h recall periods provides low precision for the individual estimates of intakes for nutrients that are not evenly distributed within individual diets (e.g., vitamin A and vitamin B12) but provides good precision for estimating the average and interindividual variability of intakes in a population for most nutrients, including iron and zinc. Furthermore, remaining error related to the intraindividual variability of intake for iron and zinc was addressed by extraction when assessing usual intake, as presented below.

Iron and zinc bioavailability

We first considered heme iron (mainly present in red meat) and nonheme iron (present in other animal-based and plant-based foods) (19). The following equation was used for the absorption of heme iron (20):

$$\text{Log Absorption (\%)} = 1.9897 - 0.3092 \times \log(\text{SF}) \quad (1)$$

where SF is serum ferritin, which was set at 15 $\mu\text{g/L}$ (15). A serum ferritin value of 15 $\mu\text{g/L}$ corresponds to an absence of iron reserve and a higher intestinal absorption, without any further functional impact (21). This value, as compared with 30 $\mu\text{g/L}$, leads to a better estimate of iron absorption at marginal amounts of iron intake. It also provides the lowest estimate of the iron requirement, which is the least favourable situation for our hypothesis that current estimates of iron requirement limit the identification of healthier diets.

For nonheme iron, we used the following equation (22):

$$\begin{aligned} \text{Ln Absorption (\%)} = & 6.294 - 0.709 \ln(\text{SF}) + 0.119 \ln(\text{C}) \\ & + 0.006 \ln(\text{MFP} + 0.1) - 0.055 \ln(\text{T} + 0.1) \\ & - 0.247 \ln(\text{P}) - 0.137 \ln(\text{Ca}) - 0.083 \ln(\text{NH}) \end{aligned} \quad (2)$$

where SF is serum ferritin, which was also set at 15 $\mu\text{g/L}$, 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 nonheme iron (mg).

For zinc absorption, we used the following equation (23):

$$\begin{aligned} \text{TAZ} = & 0.5 \times \left\{ 0.033 \times \left(1 + \frac{\text{TDP}}{0.68} \right) + 0.091 + \text{TDZ} \right. \\ & \left. - \sqrt{\left(0.033 \times \left(1 + \frac{\text{TDP}}{0.68} \right) + 0.091 + \text{TDZ} \right)^2 - 4 \times 0.091 \times \text{TDZ}} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

where TAZ is bioavailable zinc (mmol), TDZ is dietary zinc (mmol), and TDP is dietary phytate (mmol).

Multicriteria optimization of the diet

A multiobjective, nonlinear, constrained optimization program was developed using the optmodel procedure under SAS software (SAS Institute[®], Inc., version 9.4). The decision variables were the average daily consumptions of the 45 food groups. We considered male and female populations, the latter being divided into 2 subpopulations as a function of their iron requirement amounts (Fe⁻ or Fe⁺ females). Indeed, ~80% of premenopausal females have “low to medium” iron requirements (Fe⁻) that are covered by 1.72 mg/d bioavailable iron, and 20% have “high” iron requirements (Fe⁺) that are covered by 2.52 mg/d (10).

The optimization procedure consisted of maximizing the health quality of the modeled diet while simultaneously minimizing its deviation from the current diet. We therefore drew upon the multicriteria diet optimization method developed in a previous study by the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES) on Healthy Eating Pattern modeling for the French FBDG (10), which considered 2 criteria in the objective function. On the one hand, the *Health* criteria was set as the objective compliance with dietary recommendations derived from epidemiological knowledge regarding the associations between the consumption of certain food groups and the risk of chronic diseases (24–27). The *Health* criteria was also defined as consumptions to be reduced (red meat including offal, processed meat, and soft drinks), as well as those to be increased (whole-grain products, fruit, and vegetables) in accordance with current French recommendations (24). The *Health* objective criteria was thus expressed and maximized as follows:

$$\text{Max Health} = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\text{Opt}(i)}{\text{P95}(i)} \right] - \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\text{Opt}(j)}{\text{Max}(j)} \right] \quad (4)$$

Where *i* is the number of food groups to increase (whole-grain products, fruit, and vegetables), *j* is the number of food groups to decrease (red meat, processed meat, and soft drinks), 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 the food group as defined by ANSES (in g/d).

On the other hand, the *Diet Departure* criteria was used to minimize the difference between the optimized and observed food quantities in order to account for the dietary habits of the population. This *Diet Departure* criteria was defined as the sum of the squares of the differences for each group between observed and optimized consumptions standardized by their SDs in the observed diets. We chose such a quadratic formulation (with the squares of differences) in order to favor numerous small changes across a large number of food groups, rather than a few major changes (28). The *Diet Departure* criteria was thus expressed and minimized as follows:

$$\text{Min Diet Departure} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{\text{Obs}(k) - \text{Opt}(k)}{\text{SD}(k)} \right]^2 \quad (5)$$

Where *k* is the total number of food groups, Obs(*k*) and Opt(*k*) are the observed and optimized consumptions of food group *k* (in g/d), respectively, and SD(*k*) is the observed SD of the consumption of food group *k*.

Because some food groups were considered to be more easily interchangeable, they were grouped together in the *Diet Departure* criteria so as to avoid penalizing these substitutions. These nonpenalized substitutions involved those between different kinds of fruit (fresh/dried/processed), breads (refined/whole grain), other starches (refined/whole grain), vegetable fats (low/high in α -linolenic acid), meat (poultry/red meat, excluding offal), soft drinks (beverages with added sugar/fruit juices), fish (fat/lean), fresh dairy products (natural/sweetened), and soups/bouillons.

Nutritional constraints

A large set of nutritional constraints was applied to ensure that all nutrient requirements were covered, as well as a few dietary constraints relative to certain specific food groups under the FBDG. Nutrient constraints differed for some nutrients depending on the subpopulation considered (males, Fe⁻ females, Fe⁺ females) and were based on the recently revised ANSES reference values (15) (Table 2). One exception was vitamin D, for which we did not set any lower constraint, because the reference value is known to be much too high to permit a solution from diet optimization, as the observed dietary intake is only ~20% of the reference value and diet is not the sole source of body vitamin D (10). Dietary constraints were the upper bounds for food groups that had to be reduced according to the *Health* objective criteria (i.e., their upper limits of consumption): 71 g/d for red meat [i.e. ~500 g/wk (24)], 25 g/d for processed meat, and 263 g/d (i.e. the average portion size) for soft drinks (10).

Acceptability constraints

Acceptability constraints were used to keep the modeled consumptions per food group within the range observed in each subpopulation (males, Fe⁻ females, Fe⁺ females; Supplemental Table 2). Acceptability constraints included lower and higher values, corresponding to the 5th or 95th percentiles of consumption for all food groups, except those whose upper limit was set as a dietary constraint (red meat, processed meat, and soft drinks—see above). In the acceptability constraints, in the same way as for the *Diet Departure* criteria, the most substitutable food groups (see above) were grouped together to define their lower

TABLE 2 Nutritional constraints used in the optimization models

	Lower bounds ¹		Upper bounds ²	
	Males	Females	Males	Females
Age, y	18–64	18–54	18–64	18–54
Nutrient intake				
Energy, ³ kcal/d	2470	1995	2730	2205
Retinol, µg/d	—	—	3000	3000
Vitamin A, µg/d	750	650	—	—
Thiamin, µg·(kcal/d) ⁻¹	0.42	0.42	—	—
Riboflavin, mg/d	1.6	1.6	—	—
Niacin, mg NE·(kcal/d) ⁻¹	0.0067	0.0067	—	—
Pantothenic acid, mg/d	3.77	3.22	—	—
Vitamin B6, mg/d	1.7	1.6	25	25
Folate, µg/d	330	330	—	—
Vitamin B12, µg/d	4	4	—	—
Vitamin C, mg/d	110	110	—	—
Vitamin D, µg/d	—	—	100	100
Vitamin E, mg/d	5.28	4.37	—	—
Vitamin K1, µg/d	39.47	34.48	—	—
Calcium, mg/d	950	950	2500	2500
Copper, mg/d	1.07	0.89	5	5
Bioavailable iron, mg/d				
NFlex model, ⁴	1.72	1.72 or 2.52 ⁵	—	—
Flex model, ⁴	0.83 ⁶	1.08 ⁶	—	—
Iodine, µg/d	150	150	600	600
Magnesium, mg/d	254	195	—	—
Manganese, mg/d	1.99	1.52	—	—
Phosphorus, mg/d	550	550	—	—
Potassium, mg/d	3500	3500	—	—
Selenium, µg/d	70	70	300	300
Sodium, mg/d	1500	1500	2300	2300
Bioavailable zinc, mg/d				
NFlex model, ⁴	3.63	3.23	25	25
Flex model, ⁴	1.6 ⁶	1.3 ⁶	25	25
Water, g/d	2500	2000	—	—
SFAs, %EI/d	—	—	12%	12%
Lauric, myristic, and palmitic acids, %EI/d	—	—	8%	8%
Linoleic acid, %EI/d	4%	4%	—	—
α-linolenic acid, %EI/d	1%	1%	—	—
Linoleic acid: α-linolenic acid	—	—	5	5
EPA+DHA, g/d ⁷	0.5	0.5	—	—
Sugar excluding lactose, g/d	—	—	100	100
Protein, g·(kg_bw/d)	0.83	0.83	2.3	2.3
Fiber, g/d	30	30	—	—

¹Lower bounds are the Population Reference Intake or lowest value of the macronutrient reference intake range.

²Upper bounds are the Tolerable Upper Intake Level or highest value of the macronutrients reference intake range.

³EI, energy intake (1 kcal = 0.0042 MJ).

⁴NFlex, standard multicriteria optimization model; Flex, goal programming option allowing flexibility regarding nutrient constraints for iron and zinc.

⁵For females with low-to-medium (Fe– females)/high (Fe+ females) iron requirements.

⁶Deficiency thresholds.

⁷DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

and upper bounds as the 5th or 95th percentiles of their total consumption.

Standardization of constraints to compare their relative influences

We estimated the dual values associated with each constraint; i.e., estimates of the potential gain in objective function that would result from relaxing by 1 unit the limiting bound of the considered constraint. All constraints were standardized on the value of their limiting bounds (29), so that the standardized

dual values (representing the effect of a 100% relaxation of the limiting bound) could be compared numerically with each other, and the limiting (i.e., active) constraints for nutrient and food group intakes were classified from the most to the least limiting.

Optimization models without or with flexibility on the nutrient constraints for iron and zinc

In the final stage we used a standard optimization model [nonflexible (NFlex)] and an alternative optimization model

allowing flexibility on bioavailable iron and zinc [flexible (Flex)], the latter having been identified as the most binding nutrient constraints in the standard model. This alternative optimization model was developed with goal programming rather than strict constraints on these nutrient intakes in order to study how the estimated requirements for bioavailable iron and zinc would drive and impact the composition of the modeled diets. Flexibility regarding iron and zinc intakes was thus introduced by replacing their nutrient constraints with a new goal variable added to the objective function, in order to minimize violation of the relaxed nutrient constraints while concomitantly maximizing the *Health* and minimizing the *Diet Departure* criteria. For safety reasons, new lower threshold values for bioavailable iron and zinc were also introduced as constraints and set as deficiency threshold corresponding to the minimum intake that would limit the probability of a nutritional deficiency, as previously described (30). The bioavailable zinc deficiency threshold was set at 1.6 mg in males and 1.3 mg in females (30). The bioavailable iron deficiency threshold was recalibrated to match the prevalence of iron-deficiency anemia in the French population. The distribution of bioavailable iron was log transformed, and the usual bioavailable iron distribution was derived by extracting the intraindividual variation by using the Nusser method (31). We then used the probabilistic approach (32) with Monte-Carlo simulation to estimate the number of individuals with bioavailable iron amounts below the requirement, based on the modeled distribution of usual bioavailable iron and a risk curve obtained from the cumulative distribution of the requirement as modeled during an earlier study (33) and by ANSES (34). The risk curve was then recalibrated by translation to obtain prevalence estimates that matched the actual prevalence of iron-deficiency anemia in the French population (i.e., 0.2% in males and ~4% in females) (35). The deficiency threshold was set at the 97.5th percentile of this recalibrated risk curve, and the values obtained for males and females are shown in Table 2.

As a complementary analysis, we also ran the 2 optimization models (without or with flexibility on bioavailable iron and zinc) while suppressing the *Diet Departure* term in the objective function (NFlex+ and Flex+, respectively), in order to test whether the amounts of flexibility (i.e., between-model differences) would remain similar when allowing any diet change without penalization.

Characterizing the expected health impact of modeled diets

The EpiDiet model was used to evaluate the health benefits of the modeled diets within each optimization model (NFlex and Flex), assessing expected changes in death rates, chronic disease risks, and disease burden as the number of years of life lost that would be avoided if French adults would replace their observed diet with the considered modeled diet (36, 37). EpiDiet is a simulation-based nutritional and epidemiological model previously developed by our group (37) that implements the comparative risk assessment framework. Like many other such risk assessment models (38, 39), it quantifies the positive or negative changes in risk related to long-term health that would result from changes to the average diet for an individual, group, or population. In this study, we considered the observed diet in the French population as the baseline situation and the modeled diets obtained with the NFlex and Flex optimization

models as counterfactual situations. We considered the food and nutrient intakes of males and females, grouping together Fe- and Fe+ females according to their 80:20 proportions in the population (see above). Uncertainty Intervals on health estimates, corresponding to the precision of the parameters of the EpiDiet model, were computed using Monte Carlo simulations. Details of the EpiDiet model and its application are presented in Supplemental Methods 1.

We also evaluated changes in the prevalence of iron-deficiency anemia that might be attributable to changes in bioavailable iron intake in the modeled diets, using the probabilistic approach. Bioavailable iron distribution was modeled by translating the modeled distribution of usual absorbed iron (see above) according to the difference between mean intakes for each sex and modeled diet, and used the sex-specific recalibrated risk curve for iron-deficiency anemia, as described above. CIs were built, taking into account sampling error and a binomial distribution.

Finally, we estimated the burden of disease as disability-adjusted life years (DALYs) averted or added and corresponding to changes in the risks of cerebrovascular diseases, ischemic heart diseases, diabetes, and colorectal cancer on the one hand, and changes in estimates of the prevalence of iron-deficiency anemia on the other hand, for the diets modeled using each optimization model (see Supplemental Methods 1).

Results

Standard NFlex optimization model

Compared with the observed diets, the modeled diets obtained using the first NFlex optimization model were characterized by healthier dietary patterns (Figure 1) due to some gains in the *Health* criteria at the cost of some deterioration in the *Diet Departure* criteria (Table 3). These healthier dietary patterns involved a large substitution of refined grain products (with variations of -56% to -95% between the different subpopulations) with whole-grain products, with a total grain product consumption that remained generally unchanged, alongside an increase in fruit and vegetable consumption (+45% to +71%), a reduction in processed meats (-17% to -100%) and in soft drinks among males (Supplemental Table 3). Total red meat consumption remained almost unchanged in males (-10%) but increased markedly among females (+67%) with a particular increase in offal consumption by Fe+ females. By contrast, poultry consumption increased in males and Fe+ females (+250% and +247%, respectively, but -33% in Fe- females), so that total meat consumption was finally almost similar in males (+11%) and Fe- females (+1%) but markedly increased in Fe+ females (+98%).

Whatever the population, the most limiting constraints with the greatest impact on the composition of modeled diets were bioavailable iron and zinc constraints, which displayed higher dual values than those for all other constraints affecting nutrients or food groups (Table 3). In the modeled compared with the observed diets, covering nutrient reference values led to increases in bioavailable iron and zinc that were marked among Fe- females (+42% for iron and +6% for zinc) and even greater in Fe+ females (+108% for iron and +21% for zinc) (Figure 2 and Supplemental Table 4). Reaching zinc reference values was more constraining in males, whereas meeting

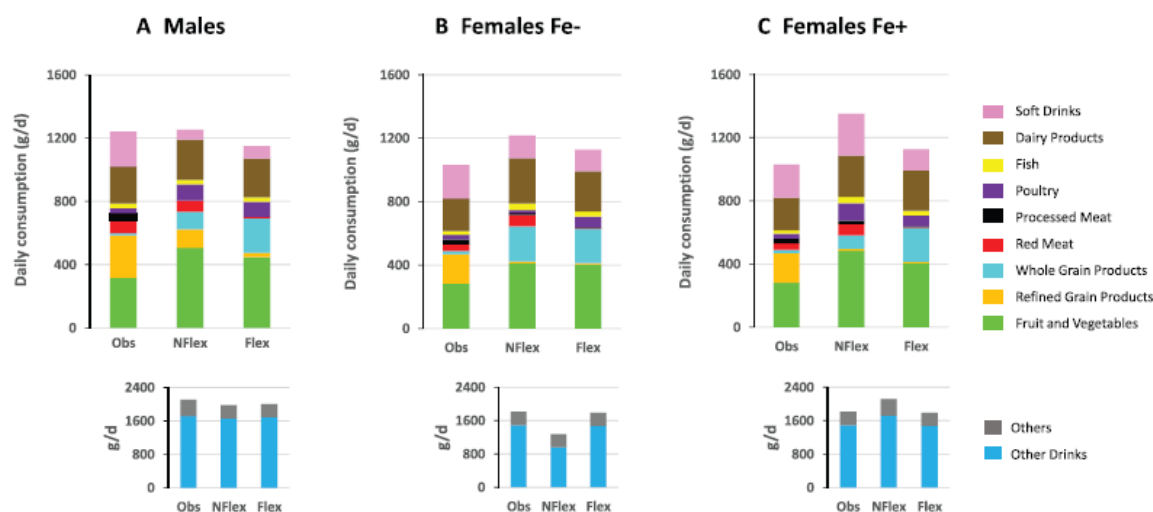


FIGURE 1 Daily food category consumption in the observed diets (Obs) and modeled diets in males (A), females with “low-to-medium” iron requirements (Fe⁻) (B), and females with high iron requirements (Fe⁺) (C), using either the standard multicriteria optimization model (NFlex) or the goal programming option allowing flexibility regarding the nutrient constraints for iron and zinc (Flex). For clarity, the 45 modeled food groups are not represented here but grouped into broader categories that are included in the *Health* criteria (such as red meat, processed meat, soft drinks, grain products, fruit, and vegetables) or represent other protein sources (poultry, fish, and dairy products). Other food groups have been grouped as “others” (20 groups) and “other drinks” (3 groups). Details are shown in Supplemental Tables 1 and 5. Flex, flexible model; NFlex, nonflexible model.

iron reference value was more constraining in females, and particularly in Fe⁺ females where it required the most important dietary changes (as can be seen from their higher *Diet Departure* value). In addition, the constraints on iron and zinc worked together by involving similar dietary changes, even if the most limiting constraint in each gender (namely, zinc in males and iron in females) was so predominant that it masked the influence of the other. In males, the influence of the iron requirement could be revealed when relaxing the zinc requirement, and vice versa in females (results not shown).

Alternative Flex optimization model

Under the alternative optimization model (Flex), flexibility was applied simultaneously to the constraints on bioavailable iron and zinc because of their interdependency. Compared with both the observed and NFlex-modeled diets, Flex-modeled diets contained less meat, and particularly less red meat, and more grain products, and notably more whole-grain products (Figure 1). As compared with NFlex, the Flex modeling option did result in a reduction in red meat (−87% to −91% compared with observed, i.e., a massive and similar reduction whatever the population) (Supplemental Tables 3 and 5), and a further increase in whole-grain products (+97% in males, −3% in Fe⁻ females, +153% in Fe⁺ females, compared with NFlex). Unlike with the NFlex-modeled diets, total meat in the Flex-modeled diets was globally similar to that of the observed diet, as poultry was also increased less in males and Fe⁺ females, and total red meat was reduced more in females.

Compared with the NFlex option, the Flex option accordingly resulted in better *Health* criteria together with lower *Diet Departure* criteria (Table 3), since fewer dietary changes were

required to cover the lower iron and zinc constraints that were by construct between the nutrient reference values and the deficiency thresholds. In the Flex-modeled diets, bioavailable iron and zinc were respectively 30% and 20% lower than their reference values in males, 37% and 14% lower in Fe⁻ females, and 57% and 14% lower in Fe⁺ females (Table 3, Figure 2 and Supplemental 4).

In the Flex optimization model, i.e., when relaxing the constraints on bioavailable iron and zinc, we found that 6 nutritional constraints were limiting, namely (and in decreasing order of importance) sodium, iodine, SFAs, α -linolenic acid, fiber, and vitamin A (Table 3). Sodium was the most limiting constraint in both sexes, followed by α -linolenic acid and SFAs in males and iodine and SFAs in females.

Estimate of changes to the disease burden resulting from modeled diets

We estimated that in French adults the mortality risk from ischemic heart diseases, cerebrovascular diseases, diabetes, and colorectal cancer would be reduced by 22% in males and 15% in females with the NFlex-modeled diets, and by 26% in males and 23% in females with the Flex-modeled diets (Table 4 and Supplemental Table 6). We also estimated that the burden of these diseases would be reduced by 24% in males and 15% in females by the NFlex-modeled diets and by 28% in males and 25% in females by the Flex-modeled diets (Supplemental Table 7). Compared with the NFlex optimization, the Flex optimization thus resulted in a further decrease in the burden of these diseases of 19% in males (+13,654 DALYs averted) and 70% in females (+7131 DALYs averted) (Table 4). By contrast, being more flexible with iron and zinc reference values would also tend to increase the prevalence of iron-deficiency anemia

TABLE 3 Values of the objective criteria used during optimization in males, females with low-to-medium iron requirements (Fe⁻), and females with high iron requirements (Fe⁺), using the standard multicriteria optimization model (NFlex) or the goal programming option allowing flexibility regarding nutrient constraints for iron and zinc (Flex)

	Males			Females Fe ⁻			Females Fe ⁺		
	Observed diet	Modeled diets		Observed diet	Modeled diets		Observed diet	Modeled diets	
		NFlex	Flex		NFlex	Flex		NFlex	Flex
Objective criteria¹									
Health	-3.18	0.17	1.04	-1.78	-0.44	0.80	-1.78	-1.53	0.81
Diet Departure	0.00	5.32	3.43	0.00	4.63	3.12	0.00	65.18	3.13
Goal		0.00	0.50		0.00	0.51		0.00	0.71
Deviations from requirements²									
Bioavailable iron		0.00	0.30		0.00	0.37		0.00	0.57
Bioavailable zinc		0.00	0.20		0.00	0.14		0.00	0.14
Dual values of nutrient constraints³									
Bioavailable zinc		34	0		0	0		0	0
Bioavailable iron		4	0		23	0		645	0
Sodium		-10	-8		-12	-8		-57	-8
Iodine		0	2		13	7		0	7
SFAs		-3	-3		-2	-5		0	-5
α -linolenic acid		4	4		5	4		9	4
Fiber		9	1		7	4		13	4
Vitamin A		2	3		1	4		0	4

¹Multicriteria optimization consisted in maximizing the *Health* criteria while minimizing the *Diet Departure* and *Goal* criteria, with the *Goal* criteria being the sum of the goal variables regarding bioavailable iron and zinc.

²Relative deviations from reference values (e.g., bioavailable iron = 0.30 means that the value is 30% below requirement), whose sum is equal to the *Goal* criteria.

³Standardized dual values representing the potential effect of a 100% relaxation of the limiting bound of the constraint considered, to classify the nutritional constraints from the most to the least limiting (i.e., active). Limiting constraints have a positive (negative) value if the lower (upper) bound is binding. Only nutrients with a limiting constraint (i.e., with a non-null dual value) are presented here.

[from 2.1% (95% CI: 1.4%, 3.9%) to 5.0% (95% CI: 3.9%, 6.4%) in adults; from 0.21% (95% CI: 0.04%, 0.98%) to 3.0% (95% CI: 1.8%, 4.6%) in males; and from 3.9% (95% CI: 2.6%, 5.9%) to 7.0% (95% CI: 5.1%, 9.4%) in females], whereas the figures would be virtually null without flexibility [0.11% (95% CI: 0.02%, 0.49%) in adults, 0.17% (95% CI: 0%, 0.65%) in males and 0.05% (95% CI: 0%, 0.66%) in females]. However, the DALYs resulting from this increase in iron-deficiency anemia with flexibility (Flex compared with NFlex) would be small when compared with the DALYs otherwise averted by the decrease in chronic disease (2705 compared with 13,654, i.e., 20% in males; and 3157 compared with 7131, i.e., 44% in females) (Table 4). Globally, when taking account of all these chronic diseases and anemia and on average over the whole population, the Flex optimization resulted in a further 18% reduction in the burden of disease compared with the NFlex optimization (+14,921 DALYs averted).

The expected reduction in mortality and disease burden with Flex-modeled diets compared with NFlex-modeled diets was mostly ascribed to the reduction in red meat consumption (Supplemental Tables 6 and 7). The increase in whole-grain products in Flex- compared with NFlex-modeled diets did not therefore result in any additional risk reduction under the comparative risk assessment model. The changes in mortality risk resulting from the changes to red meat consumption were a 3% increase in females under the NFlex option but a 5% decrease in both males and females under the Flex option, whereas the changes to mortality risks resulting from increases in whole-grain products were a similar 5% reduction in both males and females

with both options (see Supplemental Table 6). Changes to the risk of morbidity related to cerebrovascular diseases, ischemic heart diseases, diabetes, and colorectal cancer due specifically to red meat involved a 3% increase in females under the NFlex option but a 5–6% decrease in both males and females under the Flex option, whereas the changes to these morbidity risks specifically due to an increase in whole-grain consumption were a similar 4–5% decrease in both males and females with both options (see Supplemental Table 7). Soft drinks were another food group whose variations between the observed and modeled diets significantly affected the risks of mortality and morbidity, but soft drinks varied less between the NFlex and Flex options than red meat and whole-grain products, and the changes in mortality and morbidity risks due specifically to a reduction in soft drink consumption were a similar 6–8% decrease with both options (see Supplemental Tables 6 and 7).

Additional models to test the impact of criteria

We also ran additional models with optimization without the *Diet Departure* criteria (i.e., with optimization on the *Health* criteria only), without or with flexibility on bioavailable iron and zinc (NFlex+ and Flex+ models, respectively). They all led to healthier dietary patterns than their standard counterparts that included the *Diet Departure* criteria, by further notable increases in the consumption of fruit and vegetables and whole-grain products (Supplemental Figure 1 and Supplemental Tables 3 and 5). The differences between Flex+ and NFlex+ were similar to those previously observed between Flex and NFlex with regard

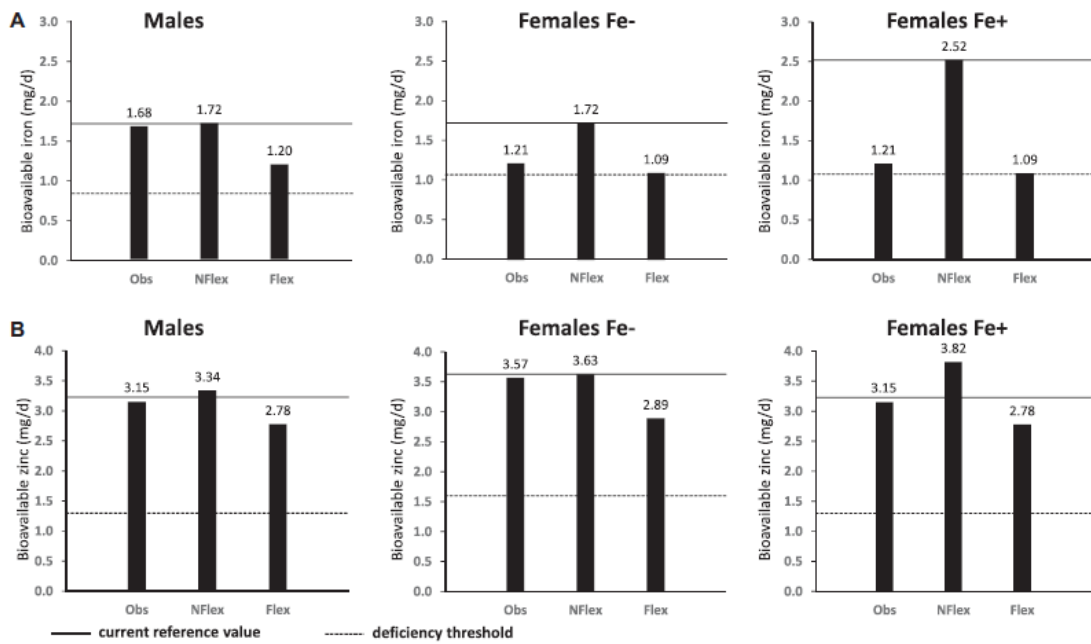


FIGURE 2 Amounts of bioavailable iron (A) and bioavailable zinc (B) under the observed diets (Obs) and modeled diets in males, females with “low-to-medium” iron requirements (Fe⁻), and females with high iron requirements (Fe⁺) using either the standard multicriteria optimization model (NFlex) or the goal programming option allowing flexibility regarding nutrient constraints for iron and zinc (Flex). The solid lines indicate the current reference values for the nutrient and population considered, which are used as the lower bound of the constraint in the NFlex model, and the broken lines indicate the deficiency threshold for the nutrient and population considered that is used as the lower bound of the constraint in the Flex model. Flex, flexible model; NFlex, nonflexible model.

This is corrected figure; please see <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqac105>

to diet contents in red meat (only reduced under Flex+ and not under NFlex+) and whole grains (further increased in Flex+ compared with NFlex+), and also with regard to the amounts of bioavailable iron and zinc that were similarly reduced in the event of flexibility, whether the *Diet Departure* criteria was integrated or not (Supplemental Figure 2). Lastly, the dual values analysis showed that like the NFlex and Flex models, the most limiting constraint for healthier diets were bioavailable iron and zinc in the NFlex+ model and sodium, iodine, vitamin A, energy intake, DHA, and EPA in the Flex+ model (Supplemental Table 8).

Discussion

Our study has revealed a conflict between meeting current estimates for iron and zinc requirements that take account of their bioavailability, and implementing a healthy diet. We have indeed shown that in males and females, securing iron and zinc provisions precludes a reduction in red meat consumption and limits any increase in whole-grains. By contrast, both of these goals can be achieved by allowing some flexibility regarding current reference values for bioavailable iron and zinc which leads to contrasted effects on health (more anemia but less chronic disease) but a better overall balance (18% more DALYs averted with flexibility than without).

Without flexibility, we have shown by dual value analysis that bioavailable iron and zinc were always the most limiting nutrients when modeling healthier dietary patterns in both males and females and whether or not account was taken of dietary cultural inertia (standard NFlex and additional NFlex+ models). This conflict between meeting the estimated requirements for bioavailable iron and zinc and adopting healthier dietary patterns therefore appears to concern all populations and prevailing dietary contexts. We have also shown that this limitation, and the effect of it being removed by flexibility, was further accentuated when considering females with high iron requirements. In this case, the very high target value for bioavailable iron fully precluded any reduction in red meat and also largely limited the increase in whole-grains (because of their phytate content that limits iron bioavailability). Although the nutrients with the greatest influence were zinc in males and iron in females, in all cases iron and zinc were the 2 most influential nutrients and worked together by driving similar dietary changes. This could be explained by the fact that the dietary contributors of iron intake are mostly the same as those of zinc, and iron and zinc absorption are both largely dependent on phytate (2, 3).

Animal products, and particularly meat and red meat, are known to be important contributors to iron and zinc intakes, and iron requirements are known to be high for the top quintile of females of childbearing age, whereas the phytate content in plants

TABLE 4 Expected changes to mortality and morbidity in French adults resulting from the adoption of modeled diets as compared with observed diets

	Modeled diets					
	Adults (> 18 y)		Males (18–64 y)		Females ¹ (18–54 y)	
	NFlex ²	Flex ²	NFlex	Flex	NFlex	Flex
Decrease in mortality risk, % (95% UI) ^{3,4}						
Ischemic heart diseases	20 (18, 22)	19 (18, 21)	20 (18, 22)	19 (17, 21)	24 (21, 27)	23 (19, 26)
Cerebrovascular diseases	16 (13, 18)	23 (21, 26)	17 (14, 20)	24 (21, 27)	11 (8, 13)	21 (18, 24)
Diabetes	35 (34, 37)	46 (44, 48)	37 (35, 39)	47 (45, 49)	21 (18, 23)	39 (37, 41)
Colorectal cancer	23 (21, 25)	31 (29, 34)	26 (23, 28)	33 (31, 36)	12 (10, 14)	24 (22, 26)
Total	21 (19, 23)	25 (24, 27)	22 (20, 24)	26 (24, 28)	15 (13, 16)	23 (21, 25)
DALYs averted, (95% UI) ^{4,5}						
Ischemic heart diseases	28,130 (25,581, 30,678)	27,156 (24,648, 29,664)	25,468 (22,942, 27,994)	24,618 (22,133, 27,104)	2661 (2324, 2999)	2538 (2200, 2875)
Cerebrovascular diseases	14,359 (12,370, 16,348)	21,870 (19,794, 23,945)	11,541 (9,657, 13,426)	16,185 (14,244, 18,127)	2817 (2182, 3453)	5684 (4950, 6418)
Diabetes	22,023 (21,180, 22,865)	29,150 (28,237, 30,064)	19,681 (18,882, 20,479)	24,678 (23,795, 25,562)	2342 (2073, 2611)	4472 (4239, 4705)
Colorectal cancer	18,708 (17,202, 20,215)	25,827 (24,267, 27,388)	16,379 (14,901, 17,857)	21,241 (19,718, 22,763)	2329 (2034, 2625)	4587 (4243, 4930)
Subtotal	83,220 (79,555, 86,884)	104,003 (100,279, 107,727)	73,069 (69,498, 76,640)	86,723 (83,111, 90,334)	10,150 (9327, 10,973)	17,281 (16,372, 18,189)
Δ vs. NFlex		20,784 (15,559, 26,009)		13,654 (8574, 18,733)		7131 (5905, 8356)
Iron-deficiency anemia	1548 (1087, 2138)	- 4313 (-5500, -3169)	30 (27, 129)	- 2675 (-3556, -1771)	1518 (1060, 2009)	- 1638 (-1944, -1398)
Δ vs. NFlex		- 5862 (-7141, -4584)		- 2705 (-3599, -1811)		- 3157 (-3705, -2610)
Total	84,768 (81,066, 88,470)	99,689 (95,787, 103,591)	73,100 (69,528, 76,671)	84,048 (80,327, 87,768)	11,668 (10,718, 12,618)	15,641 (14,693, 16,590)
Δ vs. NFlex		14,921 (9,542, 20,300)		10,948 (5791, 16,105)		3973 (2631, 5315)

¹Food and nutrient intakes of Fe- and Fe+ females, used to estimate changes to risk compared with the observed situation in females using comparative risk assessment, were averaged according to their 80:20 ratio in the population.

²Flex, goal programming option allowing flexibility regarding nutrient constraints for iron and zinc; NFlex, standard multicriteria optimization model.

³Estimated changes to the risk of mortality in France comparing diets modeled using different optimization models with the current observed diet in the French adult population.

⁴Values are percentages (95% UIs) of the estimated impacts computed from modeled errors in model parameters estimates using Monte Carlo simulations. UI, uncertainty interval. UIs are shown in brackets.

⁵DALYs, disability-adjusted life years averted, comparing diets modeled with different optimization models with the currently observed diet in the French adult population.

is well known to largely inhibit nonheme iron and zinc absorption (40, 41). Yet there are few data in the literature which characterize the importance of this expected conflict when dealing with the transition toward diets with a higher plant-based content. In particular, there have been almost no diet modeling studies using health criteria that account for iron or zinc bioavailability. In a diet optimization study on environmental criteria, designed to decrease diet-induced environmental pressures that also require a reduction in red meat consumption, Barré et al. showed that including bioavailability factors tended to limit the reduction in red and processed meats (14). The model used by these authors integrated 402 food items in the same French context, whereas in the present model we focused on 45 food groups that prevented the selection of individual food items that were atypical within their group. The smaller decrease in processed meat when accounting for bioavailability indicated by Barré et al. (14) was indeed ascribed to a dramatic increase in the consumption of blood sausage (a processed meat specialty made from pork blood), which was sufficient to cover the iron reference value (88% of heme iron was sourced by this increase in blood sausage consumption according to Barré et al., whereas blood sausage accounted for only 1.5% of its food group [processed meat] consumption in our study). Ferrari et al. (42) also found that in females, the constraint related to iron requirement was incompatible with a constraint limiting red meat consumption, but these authors considered iron intake and not bioavailable iron (42) in females with low iron intakes.

Unlike iron, the importance of zinc when considering healthy dietary patterns has been little emphasized. This can again be ascribed to the paucity of data considering zinc absorption in diet modeling and also by the fact that it remains difficult to define zinc requirements using health-based criteria, as it remains difficult to assess zinc status. Although the important effect of phytate on zinc absorption is well-documented (43) and sources of zinc are animal based, evidence for altered zinc status in vegetarians is unclear (4). No adequate biomarkers for zinc status are available to derive requirement estimates. Furthermore, zinc requirements have been estimated using a factorial approach to considering physiological requirements by estimated total daily losses and zinc absorption coefficients (44).

The strength of our work was therefore that it evidenced and characterized the importance of the conflict between iron and zinc on the one hand, and red meat and whole-grain consumption on the other. This conflict stems from the importance of red meat as a contributor of iron and zinc and the importance of whole grains in decreasing iron and zinc absorption because of phytate. This work has also highlighted the importance of uncertainties regarding iron and zinc absorption and phytate contents in foods. In particular, major modeling efforts have been made to predict iron and zinc bioavailability in diets, but uncertainties remain (12, 14, 45).

Because iron and zinc are so important to defining healthy eating patterns that can be used to build FBDG, a precise assessment of iron and zinc requirements, and their recommended dietary allowances, is a primary concern. Iron and zinc reference values are based on physiological requirements assessed from estimates of mandatory losses. For zinc, again, an adequate marker of status is lacking, and it is difficult to ascertain its relevance to health. There are considerable variations in iron requirements among females, and this has led to a very high recommended

dietary allowance in order to cover 95% of these whereas most (80%) have much lower requirements. According to these requirements, iron insufficiency does not match actual iron deficiency as assessed by iron-deficiency anemia. For example, among French females, the prevalence of iron-deficiency anemia has been estimated at ~4%, whereas 20% of females have iron intakes below their requirements and most have intakes below the population reference intake (10). As demonstrated by Hallberg et al., nonheme iron absorption is higher in populations that are vulnerable to iron deficiency (46). The risk of iron-deficiency anemia could therefore be taken as a safeguard which would lead to a much lower reference target value, indeed as low as the deficiency threshold we used in the model with flexibility (Flex). The provision of iron at higher amounts than this threshold may also have health benefits in preventing iron deficiency without anemia. However, the adverse health effects of iron deficiency have been poorly characterized in literature studies, due to small sample sizes, confounding by other dietary and lifestyle factors, and alterations in iron metabolism in response to infection. Furthermore, thresholds of iron deficiency at which these adverse effects might develop have not been well characterized and their prevalence in Western countries is unknown (47). Clearly, further research is needed to characterize the relation between iron intake and iron deficiency without anemia in adults in Western countries and evaluate its importance for health. During the present study, we found that waiving the importance of iron and zinc in the Flex model brought bioavailable iron concentrations down to the deficiency threshold we used in females, which would translate into an increase in the prevalence of iron-deficiency anemia among females from ~4% at present to 7% under the modeled diets. This contrasted with the virtual absence of iron-deficiency anemia (0.05%) in the diets modeled without flexibility (NFlex) that imposed a reference value for bioavailable iron in Fe+ females that was triple the deficiency threshold. To further assess the conflict that we have evidenced, this modeled increase in iron-deficiency anemia was weighed against the expected long-term health benefits that would result from adopting a healthier diet, which could provide helpful information about the importance of the iron reference value. Using the single metric of DALYs averted, we were able to show that the long-term health benefit of diets identified as being flexible with iron and zinc outweighed the adverse effects resulting from the increase in iron-deficiency anemia.

Our work has implications for modeling healthy eating and thus dietary guidelines. To our knowledge, iron and zinc absorption have been little studied in this regard. Dietary guidelines usually advocate healthy eating patterns, similar to the diets identified during the present study (including lower red meat and higher whole-grain consumption) but with uncertainties regarding the actual benchmark levels for meat and red meat (7–9). Likewise, prospective diets for human and planetary health have defined plant-based diets as the reference, but the impact on iron status of such diets has not been fully characterized (10–12). Markedly reducing red meat and increasing whole grains imply lowering amounts of bioavailable iron and zinc, and the ensuing risk of an increase in iron-deficiency anemia. This risk may be deemed acceptable if outweighed by the clearly beneficial effects of healthier dietary patterns on chronic diseases with very high prevalence. This risk may also be acceptable if it can be mitigated. Indeed, in developed countries, iron-deficiency anemia

can be detected and treated on an individual basis, and could also be prevented by food fortification at the population level (48).

Strengths and limitations

Our study had certain strengths and limitations. One strength was the use of data and equations to monitor bioavailable iron and zinc in the modeled diets, but these bioavailability estimates involved some uncertainties (49, 50). A second strength was the use of advanced optimization models with multicriteria optimization by nonlinear programming in order to identify the food groups and nutrient-related factors that hinder or favor healthier dietary patterns. However, in terms of limitations, diet modeling and optimization can exacerbate uncertainties and are reliant on a complex definition of constraints and objectives, which often involves an implicit weighting of numerous criteria (10). For instance, regarding the constraint on bioavailable iron, although we used the most accurate estimates available, some uncertainty remained in the equation used to calculate its absorption and in the estimate of the deficiency threshold we used in the case of flexibility. The number of food groups also greatly influenced the model by smoothing the nutritional contents of the groups and thus masking any specificity of certain contributors within each group at a more detailed level. However, the food groups in the modeled diet remained interpretable because they continued to reflect the true food consumption at present within these groups. Last, we used recent, representative data for food consumption, with a sample size ($n = 1125$) that may appear to be low. A higher sample size would have been useful for better characterizing the variability of the dietary patterns in the population, but since the study mainly relies on modeled shifts in average intakes from observed diets using optimization models, the sample size is large enough to provide a good precision for these population estimates and to run nutritional/health impact analysis based on the modeled diets.

Conclusion

Using diet modeling and considering bioavailability, we have evidenced that iron and zinc are the most critical nutritional factors with respect to healthy eating patterns. Lower iron and zinc intakes from a lower consumption of meat (especially red meat) and a higher phytate intake from eating more plant-based products (especially whole grains) result in low bioavailable iron and zinc in modeled diets that tend to limit the overall health benefits of the healthiest dietary patterns. Our results highlight the predominance of iron and zinc reference values in diet modeling for FBDG.

The authors' responsibilities were as follows—AD, HF, EK-G, and FM: designed research; AD and HF: conducted research; AD: conducted data analysis and statistical analyses; HF, MS, EK-G, JW, J-FH, and FM: provided tools and methodological support; AD, HF, EK-G, and FM: interpreted the results; AD: drafted the manuscript; AD and FM: wrote the manuscript; all authors: provided critical comments on the manuscript; AD, FM: had primary responsibility for the final content; and all authors: read and approved the final manuscript. MS has a PhD fellowship 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. All other authors report no conflicts of interest.

Data Availability

Data described in the manuscript, code book, and analytic code will be made available upon request pending application and approval.

References

1. Fairweather-Tait S. Bioavailability of dietary minerals. *Biochem Soc Trans* 1996;24(3):775–80.
2. Bel-Serrat S, Stammers A-L, Warthon-Medina M, Moran VH, Iglesia-Altaba I, Hermoso M, Moreno LA, Lowe NM. Factors that affect zinc bioavailability and losses in adult and elderly populations. *Nutr Rev* 2014;72(5):334–52.
3. Hallberg L, Brune M, Rossander L. Iron absorption in man: ascorbic acid and dose-dependent inhibition by phytate. *Am J Clin Nutr* 1989;49(1):140–4.
4. Gibson RS, Raboy V, King JC. Implications of phytate in plant-based foods for iron and zinc bioavailability, setting dietary requirements, and formulating programs and policies. *Nutr Rev* 2018;76(11):793–804.
5. 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(6):1346S–52S.
6. Vos T, Lim SS, Abbafati C, Abbas KM, Abbasi M, Abbasifard M, Abbasi-Kangevari M, Abbastabar H, Abd-Allah F, Abdelalim A, et al. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet North Am Ed* 2020;396(10258):1204–22.
7. Trichopoulos A, Martínez-González MA, Tong TY, Forouhi NG, Khandelwal S, Prabhakaran D, Mozaffarian D, de Lorgeril M. Definitions and potential health benefits of the Mediterranean diet: views from experts around the world. *BMC Med* 2014;12(1):112.
8. 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): USDA, Agricultural Research Service; 2020. [Cited 2021 Jan 12]. Available from: https://www.dietaryguidelines.gov/sites/default/files/2020-07/ScientificReport_of_the_2020DietaryGuidelinesAdvisoryCommittee_first-print.pdf.
9. A modeling system to inform the revision of the Australian guide to healthy eating [Internet]. Australian Government. Department of Health and Ageing. National Health and Medical Research Council (NHMRC); 2011 Decp. 621. Report No. N55c. [Cited 2021 Jan 12]. Available from: https://www.eatforhealth.gov.au/sites/default/files/files/public_consultation/n55a_dietary_guidelines_food_modelling_111216.pdf.
10. 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;12(3):590–9.
11. van de Kamp ME, van Dooren C, Hollander A, Geurts M, Brink EJ, van Rossum C, Biesbroek S, de Valk E, Toxopeus IB, Temme EHM. Healthy diets with reduced environmental impact? The greenhouse gas emissions of various diets adhering to the Dutch food based dietary guidelines. *Am J Clin Nutr* 2013;98(1):65–81.
12. Jennings A, Tang J, Gillings R, Perfecto A, Dutton J, Speakman J, Fraser WD, Nicoletti C, Berendsen AAM, de Groot L, et al. Changing from a Western to a Mediterranean-style diet does not affect iron or selenium status: results of the New Dietary Strategies Addressing the Specific Needs of the Elderly Population for Healthy Aging in Europe (NU-AGE) 1-year randomized clinical trial in elderly Europeans. *Am J Clin Nutr* 2020;111:98–109.
13. Collings R, Harvey LJ, Hooper L, Hurst R, Brown TJ, Ansett J, King M, Fairweather-Tait SJ. The absorption of iron from whole diets: a systematic review. *Am J Clin Nutr* 2013;98:65–81.
14. Barré T, Perignon M, Gazan R, Vieux F, Micard V, Amiot M-J, Darmon N. Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: how low should we reduce meat consumption? de Souza RJ, ed. *PLoS One* 2018; 13.
15. Les références nutritionnelles en vitamines et minéraux [Internet]. Paris, France: The French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES); 2021. p. 241. [Cited 2021 Apr 20]. Available from: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2018SA0238Ra.pdf>.

16. The Third Individual and National Survey on Food Consumption (INCA3 Survey) [Internet]. The French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES); 2017. p. 24. [Cited 2021 Feb 11]. Available from: <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>.
17. 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 Cambridge University Press; 2019;22:584–600.
18. The ANSES-CIQUAL food composition table [Internet]. [Cited 2021 Jun 22]. Available from: <https://ciqual.anses.fr/#>.
19. Moretti D. Plant-based diets and iron status. Vegetarian and plant-based diets in health and disease prevention. Academic Press; 2017. p. 715–27.
20. 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(5):1147–60.
21. Walters GO, Miller FM, Worwood M. Serum ferritin concentration and iron stores in normal subjects. J Clin Pathol 1973;26(10):770–2.
22. 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(7):1136–40.
23. Scientific opinion on dietary reference values for zinc [Internet]. Parma (Italy): European Food Safety Authority (EFSA); 2014. p. 76. [Cited 2021 Feb 27]. Available from: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2903/j.efsa.2014.3844>.
24. Study of the relationship between food group consumption and risk of chronic non-communicable diseases [Internet]. Paris (France): The French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES); 2016 Nov. p. 186. [Cited 2021 Feb 11]. Available from: <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf>.
25. Harguess JM, Crespo NC, Hong MY. Strategies to reduce meat consumption: a systematic literature review of experimental studies. Appetite 2020;144.
26. Cocking C, Walton J, Kehoe L, Cashman K, 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(2):181–9.
27. Recommendations concerning diet, physical activity and sedentary behavior for adults. Paris (France): French Public Health Agency; 2019 Aug. p. 62.
28. Kramer GFH, Martinez EV, Espinoza-Orias ND, Cooper KA, Tyszler M, Blonk H. Comparing the performance of bread and breakfast cereals, dairy, and meat in nutritionally balanced and sustainable diets. Front Nutr 2018;5:9.
29. Mausser H, Grodzewich O, Romanko O, Ding Y, Gregov S, Halevy I, Kavazovic Z, Seeman T, Shioda R, Youbiss F. Normalization and other topics in multiobjective optimization. Fields-MITACS industrial problem solving workshop and the algorithmics Inc 2006; pp. 59–101.
30. 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;1–12.
31. Hoffmann K, Boeing H, Dufour A, Volatier J, Telman J, Virtanen M, Becker W, De Henauw S. Estimating the distribution of usual dietary intake by short-term measurements. Eur J Clin Nutr 2002;56(S2):S53–62.
32. National Research Council (US) Subcommittee on Criteria for Dietary Evaluation. Nutrient adequacy: assessment using food consumption surveys [Internet]. Washington (DC): National Academies Press (US); 1986. [Cited 2021 Jun 22]. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK217533/>.
33. 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(2):226.
34. Updating of the PNNS guidelines: revision of the food-based dietary guidelines [Internet]. Paris (France): The French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES); 2016. p. 190. [Cited 2021 Feb 11]. Available from: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf>.
35. Environment, Biomonitoring, Physical Activity and Nutrition Health Study (Esteban 2014–2016). Nutrition component. Bioassays: vitamins and minerals [Internet]. Saint-Maurice (France): French Public Health Agency; 2019. p. 61. [Cited 2021 Mar 13]. Available from: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-physique-physique/documents/rapport-synthese/etude-de-sante-sur-l-environnement-la-biosurveillance-l-active-physique-et-la-nutrition-esteban-2014-2016--volet-nutrition--chapitre-dosages>.
36. Schwingshackl L, Knüppel S, Michels N, Schwedhelm C, Hoffmann G, Iqbal K, De Henauw S, Boeing H, Devleeschauwer B. Intake of 12 food groups and disability-adjusted life years from coronary heart disease, stroke, type 2 diabetes, and colorectal cancer in 16 European countries. Eur J Epidemiol 2019;34(8):765–75.
37. Kesse-Guyot E, Chaltiel D, Wang J, Pointereau P, Langevin B, Allès B, Rebouillat P, Lairon D, Vidal R, Mariotti F, et al. Sustainability analysis of French dietary guidelines using multiple criteria. Nature Sustainability 2020;3(5):377–85.
38. 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.
39. Murray CJL, Lopez AD. Measuring the global burden of disease. N Engl J Med 2013;369(5):448–57.
40. 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 Cleaner Prod 2017;165:930–50.
41. Schlemmer U, Frølich W, Prieto R, Grases F. Phytate in foods and significance for humans: food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis. Mol Nutr Food Res 2009;53(S2):S330–75.
42. Ferrari M, Benvenuti L, Rossi L, De Santis A, Sette S, Martone D, Piccinelli R, Le Donne C, Leclercq C, Turrini A. Could dietary goals and climate change mitigation be achieved through optimized diet? The experience of modeling the national food consumption data in Italy. Front Nutr 2020;7.
43. 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(1):135–41.
44. Dietary reference values for nutrients summary report [Internet]. The European Food Safety Authority (EFSA); 2017. p. 98. [Cited 2021 Mar 25]. Available from: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/sp.efsa.2017.e15121>.
45. Miller LV, Krebs NF, Hambidge KM. Mathematical model of zinc absorption: effects of dietary calcium, protein and iron on zinc absorption. Br J Nutr 2013;109:695–700.
46. Hallberg L, Hulthén L, Gramatkovski E. Iron absorption from the whole diet in men: how effective is the regulation of iron absorption? Am J Clin Nutr 1997;66:347–56.
47. Iron and health [Internet]. London (United Kingdom): Scientific Advisory Committee on Nutrition; 2010. p. 361. [Cited 2021 Apr 19]. Available from: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/339309/SACN_Iron_and_Health_Report.pdf.
48. Das JK, Salam RA, Mahmood SB, Moin A, Kumar R, Mukhtar K, Lassi ZS, Bhutta ZA. Food fortification with multiple micronutrients: impact on health outcomes in general population. Cochrane Database Syst. Rev 2019;12.
49. Hurrell R, Egli I. Iron bioavailability and dietary reference values. Am J Clin Nutr 2010;91:1461S–67S.
50. Hunt JR. Algorithms for iron and zinc bioavailability: are they accurate? Int J Vit Nutr Res 2010;80:257–62.

Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc – a diet optimization study in French Adults.

Dussiot *et al.*

Online Supplementary Material

SUPPLEMENTAL TABLE 1 Summary of foods groups formed for food categorization

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion of food group within the category	Main types of foods (Proportion of foods within the group)
Fruit and vegetables (244)	Vegetables (149)	61%	Raw vegetables (~ 40%) Cooked vegetables (~ 30%)
	Fresh fruit (50)	20%	Raw fruit (100%)
	Dried fruits (9)	4%	Dried fruits (70%) Chestnuts (30%)
	Processed fruits: compotes and cooked fruit (13)	5%	Compote (40%) Fruit in syrup (40%)
	Nuts, seeds and oleaginous fruits (23)	9%	Oleaginous fruits (~ 50%) Seeds (~ 40%)
Starches (171)	Bread and refined bakery products (36)	21%	Breads (~ 50%) Rusks (~ 20%)
	Whole meal and semi-refined bread and bakery products (15)	9%	Breads (~ 50%) Rusks (~ 30%)
	Other refined starches (13)	8%	Rice (~ 30%) Pasta (~ 20%)
	Other complete and semi- complete starches (11)	6%	Wheat (50%) Quinoa (20%)
	Starch-based products, sweet/fat processed (61)	36%	Breakfast cereals (~ 50%) Cookies (~ 20%)
	Salt/fat processed starch products (15)	9%	Savory cookies (~ 50%) Chips: 4 foods (~ 20%)
	Potatoes and other tubers (20)	12%	Potatoes (~ 50%) Other tubers (~ 20%)
Legumes (16)	Legumes (16)	100%	Dried beans (~ 50%) Lentils (15%)

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion within the category	Main types of foods (Proportion of food within the group)
Meats, Processed meats, Fish products, Eggs (315)	Poultry (24)	8%	Chicken (~ 30%) Duck (~ 20%)
	Beef and veal (40)	13%	Beef (~ 65%) Veal (~ 35%)
	Pork and other meats (39)	12%	Pork (~ 40%) Lamb (~ 30%)
	Offal (19)	6%	Beef and veal (~ 50%)
	Processed meats (71)	23%	Sausages, "andouilles" (~ 35%) "Rillettes", "pâtés", "terrines", "foie gras" (~ 35%)
	Oily fish (32)	10%	Salmon (~ 30%) Mackerel (~ 20%)
	Other fish (55)	17%	Tuna (~ 15%) Trout (~ 10%)
	Mollusks and crustaceans (21)	7%	Mollusks excluding cephalopods (40%) Crustaceans (~ 30%)
	Eggs and egg-based dishes (14)	4%	Whole eggs (~ 65%) Egg yolks (~ 20%)
Milk and dairy products (192)	Milk (15)	8%	Semi-skimmed cow's milk (40%) Whole cow's milk (25%)
	Fresh natural dairy products (18)	9%	Yoghurts, fermented milks and dairy specialties (~ 55%) Cottage cheeses, "Faisselles", "Petit Suisse" (~ 45%)
	Fresh sweetened dairy products (39)	20%	Yoghurts, fermented milks and dairy specialties (~ 65%) Cottage cheeses, "Faisselles", "Petit Suisse" (~ 25%)
	Sweet milky desserts (22)	11%	Cream desserts (~ 60%) Other sweet desserts (~ 25%)
	Cheese (98)	51%	-

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion within the category	Main types of foods (Proportion of food within the group)
Added fats and oils (98)	Animal fats and assimilated fats (4)	4%	Lard, bacon, duck or goose fat
	Butter and low-fat butter (11)	11%	Butter (55%) Low-fat butter (45%)
	Vegetable fats rich in alpha- linoleic acid (4)	4%	Vegetable oils (100%): rapeseed, flax, walnut, soybean
	Vegetable fats rich in alpha- linoleic acid (24)	24%	Vegetable oils (peanut, sunflower, palm, frying) (33%) Vegetable fats (margarine type) (67%)
	Sauces and fresh creams (55)	56%	Hot sauces (80%) Cold sauces (ketchup, mustard, mayo, miso)
Sweet products or Sweet and fatty products (198)	Sweet products or sweet and fatty products (198)	100%	Pastries (~ 15%) Cookies (~ 10%)
Drinking water (44)	Drinking water (44)	100%	-
Alcohol-free soft drinks (74)	Sweetened soda-type drinks (45)	61%	-
	Fruit juices (29)	39%	-
Hot drinks (22)	Hot drinks (22)	100%	Coffee and related products (~ 60%) Tea and herbal teas (~ 30%)
Salt (6)	Salt (6)	100%	-
Condiments (13)	Condiments (13)	100%	Olives or similar (~ 50%) Vinegar products (~ 20%)
Aromatic herbs, Spices except salt (38)	Aromatic herbs, spices except salt (38)	100%	Aromatic herbs (~ 65%) Spices (35%)

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion within the category	Main types of foods (Proportion of food within the group)
Soups and Bouillons (38)	Soups (30)	79%	Vegetable soups (with or without cheese) (85%) Soups with OPV (15%)
	Bouillons (8)	21%	Broths with meat (75%) Vegetable broths only (25%)
Substitutes of animal products (9)	Substitutes for animal products (9)	100%	Soy products (~ 90%) Almond drink (~ 10%)
Other foods (14)	Other foods (14)	100%	Fish eggs (~ 40%) Vinegars (25%)
Alcoholic drinks (41)	Alcoholic drinks (41)	100%	-

SUPPLEMENTAL TABLE 2 Summary of constraints and criteria for each food group retained in the optimization model for males and females

Food group	Optimization objective	Males				Females			
		Observed consumption (g/d)	Constraints			Observed consumption (g/d)	Constraints		
			Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper joint limit (g/d)		Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper joint limit (g/d)
Vegetables	Maximization	176	20	400	-	160	18	387	-
Fresh fruit		128	0	-	-	107	0	-	-
Dried fruits	Maximization	1	0	-	453	1	0	-	359
Processed fruit: compotes and cooked fruit		13	0	-	-	15	0	-	-
Nuts, seeds and oleaginous fruit		3	0	20	-	2	0	14	-
Bread and refined bakery products		168	27	-	-	115	10	-	-
Complete and semi-complete bread and bakery products	Maximization	11	0	-	-	15	0	-	-
Other refined starches		98	0	-	-	72	0	-	-
Other complete and semi-complete starches	Maximization	4	0	-	-	4	0	-	-
Starch-based products, sweet/fat processed		22	0	97	-	19	0	82	-
Salt/fat processed starch products		4	0	21	-	2	0	14	-
Potatoes and other tubers		79	0	264	-	49	0	196	-
Legumes		13	0	86	-	6	0	43	-
Poultry		30	0	108	-	31	0	109	-
Beef and veal		48	0	-	-	28	0	-	-
Pork and other meats	Minimization	27	0	-	71	13	0	-	71
Offal		4	0	-	-	1	0	-	-
Processed meats	Minimization	50	0	25	-	30	0	25	-
Oily fish		8	0	54	-	6	0	41	-
Other fish		22	0	110	-	15	0	80	-

Food group	Optimization objective	Males				Females			
		Observed consumption (g/d)	Constraints			Observed consumption (g/d)	Constraints		
			Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper Joint limit (g/d)		Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper joint limit (g/d)
Mollusks and crustaceans		5	0	28	-	4	0	26	-
Eggs and egg-based dishes		14	0	61	-	14	0	70	-
Milk		84	0	343	-	75	0	322	-
Fresh natural dairy products		31	0	138	-	33	0	143	-
Fresh sweetened dairy products		50	0	179	-	48	0	168	-
Sweet milky desserts		19	0	93	-	16	0	73	-
Cheeses		49	0	131	-	36	0	94	-
Animal fats and assimilated fats		1	1	1	-	0	0	0	-
Butter and light butter		10	0	33	-	10	0	30	-
Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid		0	0	-	32	0	0	-	30
Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid		12	0	-		10	0	-	
Sauces and fresh creams		35	0	118	-	32	0	100	-
Sweet products or sweet and fatty products		103	9	251	-	83	9	215	-
Drinking water		1,007	182	-	-	929	75	-	-
Sweetened soda-type drinks	Minimization	141	0	-	263	140	0	-	263
Fruit juices		80	0	-		67	0	-	
Hot drinks		494	0	494	-	507	0	507	-
Salt		1	0	4	-	1	0	4	-
Condiments		4	0	29	-	3	0	21	-
Aromatic herbs, Spices except salt		2	0	7	-	2	0	6	-
Soups		71	0	434	-	75	0	381	-
Bouillons		5	0	21	-	4	0	25	-

Food group	Optimization objective	Males				Females			
		Observed consumption (g/d)	Constraints			Observed consumption (g/d)	Constraints		
			Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper joint limit (g/d)		Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper joint limit (g/d)
Substitutes for animal products		3	0	29	-	5	0	29	-
Other foods		4	4	4	-	2	2	2	-
Alcoholic drinks		216	0	216	-	59	0	59	-
Bread and bakery products		178	-	354	-	130	-	316	-
Other starches		102	-	276	-	76	-	188	-
Liquids		2,098	1,061	3,777	-	1,857	738	3,087	-

SUPPLEMENTAL TABLE 3 Changes to food category consumption under observed and modeled diets in males, females with low to medium iron requirements (Fe-), and females with high iron requirements (Fe+)

	Modeled diets											
	Males				Females Fe-				Females Fe+			
	NFlex	Flex	NFlex+	Flex+	NFlex	Flex	NFlex+	Flex+	NFlex	Flex	NFlex+	Flex+
Differences from observed diets, %												
Δ Fruit & Vegetables	59%	41%	168%	168%	45%	43%	163%	163%	71%	43%	163%	163%
Δ Refined Grain Products	-56%	-90%	-90%	-90%	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%
Δ Whole Grain Products	633%	1,347%	2,027%	2,707%	1,051%	1,015%	1,731%	1,959%	341%	1,015%	870%	1,954%
Δ Red Meat	-10%	-87%	-59%	-100%	67%	-91%	-48%	-100%	67%	-91%	67%	-100%
Δ Processed meat	-100%	-100%	-100%	-100%	-57%	-83%	-100%	-100%	-17%	-83%	-100%	-100%
Δ Poultry	250%	217%	260%	260%	-33%	120%	247%	247%	247%	120%	247%	247%
Δ Fish	-10%	-3%	30%	-43%	82%	45%	82%	-16%	82%	45%	82%	-16%
Δ Dairy Products	9%	5%	230%	9%	38%	23%	126%	19%	26%	23%	-33%	76%
Δ Soft Drinks	-72%	-65%	-100%	-100%	-32%	-36%	-100%	-100%	27%	-36%	-100%	-100%
Δ Other Drinks	-3%	-2%	113%	-27%	-36%	-1%	-61%	22%	15%	-1%	81%	-53%
Δ Others	-19%	-18%	-45%	-12%	-3%	-4%	-50%	-55%	23%	-3%	20%	-56%
Differences from observed diets, g/d												
Δ Fruit & Vegetables	189	131	535	535	129	121	463	463	203	121	463	463
Δ Refined Grain Products	-149	-239	-239	-239	-176	-176	-176	-176	-176	-176	-176	-176
Δ Whole Grain Products	95	202	304	406	203	196	334	378	66	196	168	377
Δ Red Meat	-8	-69	-47	-79	29	-38	-20	-42	29	-38	29	-42
Δ Processed meat	-50	-50	-50	-50	-17	-25	-30	-30	-5	-25	-30	-30
Δ Poultry	75	65	78	78	-10	38	78	78	78	38	78	78
Δ Fish	-3	-1	9	-13	18	10	18	-3	18	10	18	-3
Δ Dairy Products	21	12	535	22	80	47	262	39	54	48	-69	158
Δ Soft Drinks	-159	-144	-221	-221	-67	-75	-208	-208	55	-75	-208	-208
Δ Other Drinks	-56	-28	1,933	-464	-534	-17	-906	328	229	-17	1,207	-789
Δ Others	-75	-72	-177	-45	-11	-12	-161	-178	73	-11	65	-181

Observed diet: Obs, Diet modeled with the non-flexible optimization model: NFlex, Diet modeled with the flexible optimization model: Flex, Diet modeled with the non-flexible optimization model without the Diet Departure criteria: NFlex+, Diet modeled with the flexible optimization model without the Diet Departure criteria: Flex+. The 45 food groups are not represented here but only those food categories included in the Health sub-function (red meat, processed meat, soft drinks, cereal products, fruit and vegetables) as well as other protein sources (poultry, fish and dairy products). "Others" are 20 food groups combined together for clarity. "Other drinks" are three food groups. Full details are provided in Supplemental Tables 1 and 4. Data are means for each population.

SUPPLEMENTAL TABLE 4 Daily energy and nutrient intakes under the observed diets (Obs) and modeled diets in males, females with low to medium iron requirements (Fe-), and females with high iron requirements (Fe+), using either the standard multicriteria optimization model (NFlex) or the goal programming optimization allowing flexibility regarding nutrient constraints for zinc and iron (Flex)

Nutrient	Unit	Males			Females Fe-			Females Fe+		
		Observed diet	Modeled diets		Observed diet	Modeled diets		Observed diet	Modeled diets	
			NFlex	Flex		NFlex	Flex		NFlex	Flex
Energy intake	kcal·d ⁻¹	2,731	2,531	2,470	2,024	2,205	2,130	2,024	2,205	2,128
Retinol	µg·d ⁻¹	573	468	496	395	375	375	395	1,067	375
Vitamin A	µg·d ⁻¹	805	750	750	608	650	650	608	1,435	650
Vitamin B1	µg·(kcal·d) ⁻¹	0.54	0.48	0.51	0.56	0.55	0.56	0.56	0.65	0.56
Vitamin B2	mg·d ⁻¹	2.2	2.3	2.1	1.7	1.8	1.9	1.7	2.3	1.9
Vitamin B3	mg·(kcal·d) ⁻¹	0.020	0.020	0.020	0.020	0.010	0.020	0.020	0.020	0.020
Vitamin B5	mg·d ⁻¹	6.9	7.4	6.9	5.3	6.1	6.3	5.3	8.2	6.3
Vitamin B6	mg·d ⁻¹	2.1	2.3	2.0	1.5	2.0	1.8	1.5	2.8	1.8
Vitamin B9	µg·d ⁻¹	347	380	381	280	371	359	280	488	359
Vitamin B12	µg·d ⁻¹	6.3	8.3	6.0	4.3	7.3	5.1	4.3	14	5.1
Vitamin C	mg·d ⁻¹	98	110	110	84	114	110	84	158	110
Vitamin D	µg·d ⁻¹	3.5	3.5	3.5	2.9	3.8	3.5	2.9	4.3	3.5
Vitamin E	mg·d ⁻¹	13	15	15	11	14	13	11	15	13
Vitamin K1	µg·d ⁻¹	118	164	150	111	156	151	111	215	151
Calcium	mg·d ⁻¹	1,065	1,104	1,028	892	950	991	892	950	991
Copper	mg·d ⁻¹	2.1	2.2	2.2	1.6	1.9	2.0	1.6	3.3	2.0
Iron	mg·d ⁻¹	13	14	13	10	13	12	10	17	12
Bioavailable Iron	mg·d ⁻¹	1.68	1.72	1.20	1.21	1.72	1.09	1.21	2.52	1.09
Bioavailable Iron (ratio)	%	13%	12%	9%	12%	13%	9%	12%	15%	9%
Iodine	µg·d ⁻¹	175	160	150	145	150	150	145	176	150
Magnesium	mg·d ⁻¹	409	463	465	330	382	435	330	406	435

Obs, observed diet; NFlex, diet modeled using the standard non-flexible optimization model for bioavailable zinc and iron; Flex, diet modeled using the flexible optimization model for bioavailable zinc and iron. In the observed diets, out of bounds intakes are in bold. In the modeled diets, intakes being at the bound (i.e., corresponding to active and binding constraints) are in white on a black background and those allowed to go below the standard bounds (cases of iron and zinc in Flex) are framed on a grey background.

SUPPLEMENTAL TABLE 4 CONT. Daily energy and nutrient intakes under the observed diets (Obs) and modeled diets in males, females with “low-to-medium” iron requirements (Fe-), and females with high iron requirements (Fe+), using either the standard multicriteria optimization model (NFlex) or the goal programming option allowing flexibility regarding nutrient constraints for zinc and iron (Flex)

Nutrient	Unit	Males			Females Fe-			Females Fe+		
		Observed diet	Modeled diets		Observed diet	Modeled diets		Observed diet	Modeled diets	
			NFlex	Flex		NFlex	Flex		NFlex	Flex
Manganese	mg·d ⁻¹	3.6	3.9	4.4	3.1	4.0	4.3	3.1	3.4	4.3
Phosphorus	mg·d ⁻¹	1,483	1,600	1,462	1,128	1,422	1,341	1,128	1,571	1,339
Potassium	mg·d ⁻¹	3,736	4,413	3,983	2,906	3,611	3,788	2,906	4,762	3,787
Selenium	μg·d ⁻¹	146	139	127	120	113	120	120	161	120
Sodium	mg·d ⁻¹	3,938	2,300	2,300	3,100	2,300	2,300	3,100	2,300	2,300
Zinc	mg·d ⁻¹	12	13	9.6	8.8	12	8.8	8.8	13	8.8
Bioavailable zinc	mg·d ⁻¹	3.57	3.63	2.89	3.15	3.34	2.78	3.15	3.82	2.78
Bioavailable zinc (ratio)	%	30%	27%	30%	36%	28%	32%	36%	29%	32%
Water	g·d ⁻¹	2,780	2,699	2,643	2,422	2,016	2,458	2,422	2,995	2,459
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	14%	12%	12%	15%	12%	12%	15%	10%	12%
Lauric + myristic + palmitic acids	%EI·d ⁻¹	8%	8%	8%	9%	8%	8%	9%	7%	8%
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	3%	4%	4%	3%	5%	4%
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	0%	1%	1%	0%	1%	1%
Linoleic acid: α-linolenic acid	-	8	4	4	7	4	4	7	5	4
EPA+DHA	g·d ⁻¹	0.33	0.50	0.51	0.22	0.50	0.50	0.22	0.50	0.50
Sugar without lactose	g·d ⁻¹	102	100	100	80	100	100	80	100	100
Protein	g·(kg _{bw} ·d) ⁻¹	105	113	92	77	90	82	77	114	81
Fiber	g·d ⁻¹	23	30	30	19	30	30	19	30	30
Phytate	mg·d ⁻¹	730	829	1,020	595	977	985	595	639	985
Salt	g·d ⁻¹	9.8	5.7	5.7	7.8	5.9	5.7	7.8	5.8	5.7
Lipids	g·d ⁻¹	98	97	94	78	85	81	78	83	81
		Males			Females Fe-			Females Fe+		

Nutrient	Unit	Observed diet	Modeled diets		Observed diet	Modeled diets		Observed diet	Modeled diets	
			NFlex	Flex		NFlex	Flex		NFlex	Flex
MUFA	<i>g·d⁻¹</i>	34	36	35	27	32	29	27	33	29
PUFA	<i>g·d⁻¹</i>	13	16	17	10	15	14	10	16	14
Alcohol	<i>g·d⁻¹</i>	23	17	22	4.9	4.9	4.9	4.9	4.8	4.9
Cholesterol	<i>mg·d⁻¹</i>	394	422	357	300	357	308	300	644	308

Obs, observed diet; NFlex, diet modeled using the standard non-flexible optimization model for bioavailable zinc and iron; Flex, diet modeled using the flexible optimization model for bioavailable zinc and iron. In the observed diets, out of bounds intakes are in bold. In the modeled diets, intakes being at the bound (i.e., corresponding to active and binding constraints) are in white on a black background and those allowed to go below the standard bounds (case of iron and zinc in Flex) are framed on a grey background. DHA, docosahexaenoic acid; EI, energy intake; EPA, eicosapentaenoic acid. MUFA, monounsaturated fatty acids; PUFA, polyunsaturated fatty acids. 1 kcal = 0.0042 MJ.

SUPPLEMENTAL TABLE 5 Absolute amounts of food category consumption under observed and modeled diets in males, females with low to medium iron requirements (Fe-), and females with high iron requirements (Fe+)

	Males					Females Fe-					Females Fe+				
	Observed diet	Modeled diets				Observed diet	Modeled diets				Observed diet	Modeled diets			
		NFlex	Flex	NFlex+	Flex+		NFlex	Flex	NFlex+	Flex+		NFlex	Flex	NFlex+	Flex+
Diet composition, g/d															
Fruit & Vegetables	318	507	449	853	853	283	412	404	746	746	283	486	404	746	746
Refined Grain Products	266	117	27	27	27	186	10	10	10	10	186	10	10	10	10
Whole Grain Products	15	110	217	319	421	19	222	215	353	397	19	85	215	187	396
Red meat	79	71	10	32	0	42	71	4	22	0	42	71	4	71	0
Processed meat	50	0	0	0	0	30	13	5	0	0	30	25	5	0	0
Poultry	30	105	95	108	108	31	21	69	109	109	31	109	69	109	109
Fish	30	27	29	39	17	21	39	31	39	18	21	39	31	39	18
Dairy products	233	254	245	768	255	208	288	255	470	247	208	262	256	139	366
Soft drinks	221	62	77	0	0	208	141	133	0	0	208	263	133	0	0
Other Drinks	1,717	1,661	1,689	3,650	1,253	1,495	961	1,478	589	1,823	1,495	1,724	1,478	2,702	706
Others	391	316	319	214	346	323	312	311	162	145	323	396	312	388	142

Observed diet: Obs, Diet modeled with the non-flexible optimization model: NFlex, Diet modeled with the flexible optimization model: Flex, Diet modeled with the non-flexible optimization model without the Diet Departure criteria: NFlex+, Diet modeled with the flexible optimization model without the Diet Departure criteria: Flex+. The 45 food groups are not represented here but only those food categories included in the Health sub-function (red meat, processed meat, soft drinks, cereal products, fruit and vegetables) as well as other protein sources (poultry, fish and dairy products). "Others" are 20 food groups combined together for clarity. "Other drinks" are three food groups. Data are means for each population.

SUPPLEMENTAL TABLE 6 Overall decrease in mortality risks between modeled and observed diets in adult males and females as a function of disease and dietary factors

		Adults												
Modeled diets	Diseases	Food category											Overall	
		Fruit	Vegetables	Nuts	Whole Grain Products	Red meat	Processed meat	Soft Drinks	Refined Grain Products	Eggs	Dairy Products	Fish		Legumes
NFlex	Ischemic Heart Diseases	0.9%	1.6%	0.2%	5.8%			11%			0.1%	0.0%	1.9%	20%
	Cerebrovascular Diseases	0.4%	0.2%			-0.5%	9.6%	5.7%			0.4%	0.3%		16%
	Diabetes	0.6%	0.6%		2.5%	-0.2%	21%	13%	4.4%	-1.1%	0.4%			35%
	Colorectal Cancer	0.8%	1.7%		8.7%	-0.6%	13%				1.8%			23%
	Total	0.7%	1.2%	0.1%	5.0%	-0.3%	7.1%	7.2%	0.3%	-0.1%	0.6%	0.1%	0.8%	21%
Flex	Ischemic Heart Diseases	0.9%	1.4%	0.3%	5.8%			11%			0.1%	0.3%	0.8%	19%
	Cerebrovascular Diseases	0.5%	0.2%			7.6%	10%	5.7%			0.3%	0.5%		23%
	Diabetes	0.6%	0.5%		2.4%	13%	22%	13%	6.5%	-0.9%	0.4%			46%
	Colorectal Cancer	0.7%	1.3%		8.8%	10%	13%				1.5%			31%
	Total	0.7%	1.0%	0.1%	5.0%	5.3%	7.5%	7.2%	0.5%	-0.1%	0.5%	0.3%	0.4%	25%

Estimated number of averted deaths in France expressed as a change to the overall death rate. Observed data are from the Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, $n = 1,125$. Diet modeled with the non-flexible optimization model: NFlex, Diet modeled with the flexible optimization model: Flex. Percentage of mortality risk averted = (No. of deaths averted estimated under the modeled diet - No. of deaths averted observed under the observed diet) / No. of deaths averted observed under the observed diet. In this table, each dietary factor is considered to be independent and uncorrelated.

Males														
Modeled diets	Diseases	Food category												Overall
		Fruits	Vegetables	Nuts	Whole Grain Products	Red meat	Processed meat	Soft Drinks	Refined Grain Products	Eggs	Dairy Products	Fish	Legumes	
NFlex	Ischemic Heart Diseases	0.9%	1.6%	0.2%	5.8%			11%			0.1%	-0.1%	1.9%	20%
	Cerebrovascular Diseases	0.4%	0.2%			0.2%	11%	5.4%			0.4%	-0.1%		17%
	Diabetes	0.6%	0.6%		2.5%	0.3%	23%	12%	4.3%	-1.0%	0.4%			37%
	Colorectal Cancer	0.8%	1.7%		8.7%	0.4%	15%				1.7%			26%
	Total	0.8%	1.2%	0.1%	5.0%	0.2%	7.6%	7.3%	0.4%	-0.1%	0.6%	-0.1%	0.9%	22%
Flex	Ischemic Heart Diseases	0.9%	1.4%	0.3%	5.9%			11%			0.1%	0.3%	0.8%	19%
	Cerebrovascular Diseases	0.4%	0.2%			8.1%	11%	5.4%			0.3%	0.3%		24%
	Diabetes	0.6%	0.5%		2.5%	14%	23%	12%	6.6%	-0.9%	0.4%			47%
	Colorectal Cancer	0.8%	1.4%		8.9%	11%	15%				1.5%			33%
	Total	0.7%	1.1%	0.1%	5.1%	5.4%	7.6%	7.3%	0.5%	-0.1%	0.5%	0.2%	0.4%	26%

Females														
Modeled diets	Diseases	Food category												Overall
		Fruit	Vegetables	Nuts	Whole Grain Products	Red meat	Processed meat	Soft Drinks	Refined Grain Products	Eggs	Dairy Products	Fish	Legumes	
NFlex	Ischemic Heart Diseases	0.5%	1.5%	0.0%	5.4%			14%			0.2%	1.9%	1.8%	24%
	Cerebrovascular Diseases	0.5%	0.4%			-2.9%	3.9%	6.9%			0.5%	2.1%		11%
	Diabetes	0.5%	0.6%		2.0%	-5.2%	6.9%	15%	4.8%	-1.9%	0.5%			21%
	Colorectal Cancer	0.4%	1.3%		8.6%	-4.6%	5.0%				2.2%			12%
	Total	0.5%	1.0%	0.0%	4.5%	-3.0%	3.6%	6.4%	0.3%	-0.1%	1.1%	1.2%	0.4%	15%
Flex	Ischemic Heart Diseases	0.9%	1.2%	0.6%	5.4%			14%			0.2%	1.2%	0.5%	23%
	Cerebrovascular Diseases	0.8%	0.3%			5.6%	7.8%	6.9%			0.3%	1.3%		21%
	Diabetes	0.8%	0.5%		2.0%	9.7%	14%	15%	4.8%	-1.1%	0.4%			39%
	Colorectal Cancer	0.7%	0.9%		8.6%	5.9%	8.4%				1.5%			24%
	Total	0.8%	0.7%	0.1%	4.5%	4.7%	6.7%	6.4%	0.3%	-0.1%	0.8%	0.7%	0.1%	23%

Food and nutrient intakes of Fe- and Fe+ females, used to estimate changes to risk as compared to the observed situation in females using comparative risk assessment, averaged according to the 80:20 ratio in the population.

SUPPLEMENTAL TABLE 7 Overall changes to averted Disability Adjusted Life Years (DALYs) in adult males and females as a function of diseases and dietary factors

		Adults												
Modeled diets	Diseases	Food category											Overall	
		Fruit	Vegetables	Nuts	Whole Grain Products	Red meat	Processed meat	Soft Drinks	Refined Grain Products	Eggs	Dairy Products	Fish		Legumes
NFlex	Ischemic Heart Diseases	1,285 (0.9%)	2,204 (1.6%)	260 (0.2%)	7,994 (5.8%)			15,676 (11%)			177 (0.1%)	68 (0.0%)	2,592 (1.9%)	28,130 (20%)
	Cerebrovascular Diseases	485 (0.5%)	229 (0.2%)			-679 (-0.7%)	8,589 (9.1%)	5,625 (5.9%)			374 (0.4%)	473 (0.5%)		14,359 (15%)
	Diabetes	408 (0.6%)	417 (0.6%)		1,518 (2.4%)	-450 (-0.7%)	12,791 (20%)	8,468 (13%)	2,845 (4.4%)	-762 (-1.2%)	263 (0.4%)			22,023 (34%)
	Colorectal Cancer	631 (0.8%)	1,361 (1.6%)		7,215 (8.7%)	-616 (-0.7%)	10,342 (13%)				1,488 (1.8%)			18,708 (23%)
	Total	2,809 (0.7%)	4,212 (1.1%)	260 (0.1%)	16,727 (4.4%)	-1,745 (-0.5%)	31,722 (8.4%)	29,768 (7.8%)	2,845 (0.7%)	-762 (-0.2%)	2,303 (0.6%)	541 (0.1%)	2,592 (0.7%)	83,220 (22%)
Flex	Ischemic Heart Diseases	1,249 (0.9%)	1,889 (1.4%)	415 (0.3%)	8,028 (5.8%)			15,676 (11%)			161 (0.1%)	476 (0.3%)	1,125 (0.8%)	27,156 (20%)
	Cerebrovascular Diseases	568 (0.7%)	207 (0.6%)			6,962 (7.4%)	9,666 (10%)	5,625 (5.9%)			316 (0.3%)	539 (0.6%)		21,870 (23%)
	Diabetes	429 (0.8%)	355 (0.6%)		1,491 (2.3%)	8,277 (13%)	13,681 (21%)	8,468 (13%)	4,070 (6.3%)	-624 (-1.0%)	229 (0.4%)			29,150 (45%)
	Colorectal Cancer	641 (0.8%)	1,072 (1.3%)		7,288 (8.8%)	8,170 (9.9%)	11,003 (13%)				1,277 (1.5%)			25,827 (31%)
	Total	2,887 (0.8%)	3,524 (0.9%)	415 (0.1%)	16,808 (4.4%)	23,409 (6.2%)	34,350 (9.1%)	29,768 (7.8%)	4,070 (1.1%)	-624 (-0.2%)	1,982 (0.5%)	1,014 (0.3%)	1,125 (0.3%)	104,003 (27%)

DALYs averted, comparing the modeled diet with the current observed diet in the French adult population. Observed data are from the Individual and National Study on Food Consumption Survey 3, n = 1,125. Diet modeled with the non-flexible optimization model: NFlex, Diet modeled with the flexible optimization model: Flex. Percentage of variation vs observed diet are shown in parentheses. DALYs averted = (DALYs estimated in the modeled diet - DALYs observed in the observed diet).

		Males												
		Food category												
Modeled diets	Diseases	Fruit	Vegetables	Nuts	Whole Grain Products	Red meat	Processed meat	Soft Drinks	Refined Grain Products	Eggs	Dairy Products	Fish	Legumes	Overall
NFlex	Ischemic Heart Diseases	1,225 (1.0%)	2,026 (1.6%)	262 (0.2%)	7,374 (5.8%)			14,091 (11%)			150 (0.1%)	-149 (-0.1%)	2,388 (1.9%)	25,468 (20%)
	Cerebrovascular Diseases	343 (0.5%)	126 (0.2%)			107 (0.2%)	7,558 (11%)	3,812 (5.6%)			240 (0.4%)	-82 (-0.1%)		11,541 (17%)
	Diabetes	353 (0.7%)	339 (0.6%)		1,277 (2.4%)	152 (0.3%)	11,997 (23%)	6,762 (13%)	2,287 (4.3%)	542 (-1;0%)	200 (0.4%)			19,681 (37%)
	Colorectal Cancer	550 (0.9%)	1,115 (1.8%)		5,557 (8.7%)	257 (0.4%)	9,359 (15%)				1,060 (1.7%)			16,379 (26%)
	Total	2,471 (0.8%)	3,606 (1.2%)	262 (0.1%)	14,208 (4.6%)	517 (0.2%)	28,914 (9.3%)	24,665 (7.9%)	2,287 (0.7%)	-542 (-0.2%)	1,650 (0.5%)	-231 (-0.1%)	2,388 (0.8%)	73,069 (24%)
Flex	Ischemic Heart Diseases	1,147 (0.9%)	1,752 (1.4%)	342 (0.3%)	7,409 (5.9%)			14,091 (11%)			141 (0.1%)	345 (0.3%)	1,063 (0.8%)	24,618 (20%)
	Cerebrovascular Diseases	336 (0.5%)	121 (0.2%)			5,469 (8.1%)	7,558 (11%)	3,812 (5.6%)			223 (0.3%)	179 (0.3%)		16,185 (24%)
	Diabetes	331 (0.6%)	295 (0.6%)		1,253 (2.4%)	7,161 (14%)	11,997 (23%)	6,762 (13%)	3,513 (6.7%)	-499 (-0.9%)	186 (0.4%)			24,678 (47%)
	Colorectal Cancer	498 (0.8%)	889 (1.4%)		5,630 (8.9%)	7,039 (11%)	9,359 (15%)				982 (1.5%)			21,241 (33%)
	Total	2,312 (0.7%)	3,057 (1.0%)	342 (0.1%)	14,293 (4.6%)	19,669 (6.3%)	28,914 (9.3%)	24,665 (7.9%)	3513 (1.1%)	-499 (-0.2%)	1,532 (0.5%)	523 (0.2%)	1,063 (0.3%)	86,723 (28%)

Females														
Modeled diets	Diseases	Food category												Overall
		Fruit	Vegetables	Nuts	Whole Grain Products	Red meat	Processed meat	Soft Drinks	Refined Grain Products	Eggs	Dairy Products	Fish	Legumes	
NFlex	Ischemic Heart Diseases	59 (0.5%)	178 (1.6%)	-3 (0.0%)	620 (5.5%)			1,585 (14%)		28 (0.2%)	217 (1.9%)	204 (1.8%)	2,661 (24%)	
	Cerebrovascular Diseases	142 (0.5%)	103 (0.4%)			-786 (-2.9%)	1,031 (3.8%)	1,812 (6.7%)		135 (0.5%)	555 (2.1%)		2,817 (11%)	
	Diabetes	55 (0.5%)	78 (0.7%)		241 (2.1%)	-602 (-5.2%)	794 (6.8%)	1,706 (15%)	558 (4.8%)	-220 (-1.9%)	62 (0.5%)		2,342 (20%)	
	Colorectal Cancer	81 (0.4%)	247 (1.3%)		1,658 (8.6%)	-874 (-4.6%)	983 (5.1%)				428 (2.2%)		2,329 (12%)	
	Total	337 (0.5%)	606 (0.9%)	-3 (0.0%)	2,519 (3.6%)	-2,262 (-3.3%)	2,808 (4.1%)	5,103 (7.4%)	558 (0.8%)	-220 (-0.3%)	653 (0.9%)	771 (1.1%)	204 (0.3%)	10,150 (15%)
Flex	Ischemic Heart Diseases	102 (0.9%)	137 (1.2%)	73 (0.6%)	619 (5.5%)			1,585 (14%)		20 (0.2%)	131 (1.2%)	62 (0.5%)	2,538 (22%)	
	Cerebrovascular Diseases	232 (0.9%)	86 (0.3%)			1,493 (5.5%)	2,109 (7.8%)	1,812 (6.7%)		93 (0.3%)	360 (1.3%)		5,684 (21%)	
	Diabetes	97 (0.8%)	61 (0.5%)		238 (2.0%)	1,116 (9.6%)	1,683 (15%)	1,706 (15%)	557 (4.8%)	-125 (-1.1%)	43 (0.4%)		4,472 (39%)	
	Colorectal Cancer	143 (0.7%)	183 (1.0%)		1,658 (8.6%)	1,130 (5.9%)	1,644 (8.6%)				294 (1.5%)		4,587 (24%)	
	Total	574 (0.8%)	467 (0.7%)	73 (0.1%)	2,515 (3.6%)	3,740 (5.4%)	5,436 (7.9%)	5,103 (7.4%)	557 (0.8%)	-125 (-0.2%)	450 (0.7%)	491 (0.7%)	62 (0.1%)	17,281 (25%)

Food and nutrient intakes of Fe- and Fe+ females, used to estimate changes to risk as compared to the observed situation in females using comparative risk assessment, averaged according to the 80:20 ratio in the population.

SUPPLEMENTAL TABLE 8 Values of the objective sub-functions used during optimization in males, females with low to medium iron requirements (Fe-) and females with high iron requirements (Fe+), using the standard multicriteria optimization model (NFlex) or the goal programming option allowing flexibility regarding nutrient constraints for zinc and iron (Flex), or two complementary optimization models (without or with flexibility on bioavailable iron and zinc) when suppressing the *Diet Departure* term in the objective function (NFlex+ and Flex+, respectively)

	Males					Females Fe-					Females Fe+				
	Observed diet	Modeled diets				Observed diet	Modeled diets				Observed diet	Modeled diets			
		NFlex	Flex	NFlex+	Flex+		NFlex	Flex	NFlex+	Flex+		NFlex	Flex	NFlex+	Flex+
Objectives sub-function¹															
Health	-3.18	0.17	1.04	2.16	2.80	-1.78	-0.44	0.80	2.52	2.93	-1.78	-1.53	0.81	1.44	2.93
Diet Departure	0.00	5.32	3.43	48.12	32.65	0.00	4.63	3.12	46.59	38.28	0.00	65.18	3.13	128.39	36.77
Goal		0.00	0.50	0.00	0.22		0.00	0.51	0.00	0.23		0.00	0.71	0.00	0.49
Deviations from requirements²															
Bioavailable iron		0.00	0.30	0.00	0.02		0.00	0.37	0.00	0.15		0.00	0.57	0.00	0.43
Bioavailable zinc		0.00	0.20	0.00	0.20		0.00	0.14	0.00	0.08		0.00	0.14	0.00	0.06
Dual values of nutrient constraints³															
Bioavailable zinc		34	0	3	0		0	0	2	0		0	0	0	0
Bioavailable iron		4	0	2	0		23	0	2	0		645	0	7	0
Sodium		-10	-8	-1	-1		-12	-8	-1	-1		-57	-8	-1	-1
Iodine		0	2	0	0		13	7	0	0		0	7	0	0
Vitamin A		2	3	0	0		1	4	0	0		0	4	0	0
Energy intake		0	3	0	0		-5	0	-1	0		-9	0	-1	0
EPA+DHA		0	0	0	0		1	0	0	0		2	0	0	0

¹Multi-criteria optimization consisted in maximizing the Health criteria while minimizing the Diet Departure and Goal criteria, with the Goal criteria being the sum of the goal variables on bioavailable zinc and iron intakes. ²Relative deviations from reference values (e.g. bioavailable iron = 0.30 means that the value is 30% below the requirement), whose sum is equal to the Goal criteria. ³Standardized dual values representing the potential effect of a 100% relaxation of the limiting bound of the considered constraint, in order to classify the nutritional constraints from the most to the least active. 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) are presented here. For each scenario, the most limiting constraint (i.e., with the highest absolute value) is in bold.

After relaxing the constraints on bioavailable iron and zinc (Flex optimization model), better values were obtained for the *Health and Diet Departure* criteria and five nutritional constraints were identified as still exerting a significant influence (sodium, vitamin A, alpha-linolenic acid, iodine, saturated fatty acids). Among these active constraints, sodium was the most binding in all sub-populations, as its upper limit opposed the introduction of more whole grain breads that are very high in sodium.

SUPPLEMENTAL METHOD 1 The EpiDiet model

General Principle

EpiDiet (Evaluate the Potential Impact of a Diet) is a simulation-based nutritional and epidemiological model. Like many other simulation-based risk assessment models (Grieger *et al.*, 2017; Scarborough, Harrington, *et al.*, 2014; Willett *et al.*, 2019), EpiDiet combines modeling, stochastic and optimization techniques to describe and analyze connections between diet, nutrition and the prevention of diet-related diseases, and can be used to quantify the positive or negative changes in risk related to long-term health that would result from changes in the average diet for an individual, groups or population.

The conceptual basis and methodological foundation of the EpiDiet model are laid out in the *Comparative Risk Assessment* framework (Murray and Lopez, 2013), which has been proven effective and is used extensively by various groups and organizations such as The EAT-Lancet Commission on Food, Planet and Health (Willett *et al.*, 2019), the World Health Organization (Murray and Lopez, 2013), and the Global Burden of Diseases (GBD) (GBD Risk Factors Collaborators, 2020).

Our analyses proceeded in three steps. In each component of our analyses, the data were stratified by age-band and sex in order to better take account of disparities in diet, diseases and relative risks between individuals. We selected diseases and risk factors for which hazards from mutually controlled risks were available and implemented methods that enabled account to be taken of the joint effects of changes to multiple risk factors.

First, we estimated the impact of dietary changes on the risks of morbidity and mortality from a set of chronic non-communicable diseases, using the standard computable Potential Impact Fraction (PIF) formula for a dietary factor:

$$PIF = \frac{\int_{x \in X_b} RR(x)P(x)dx - \int_{x \in X_c} RR(x)P'(x)dx}{\int_{x \in X_b} RR(x)P(x)dx}$$

Where $RR(x)$ is the relative risk of the disease at the dietary intake-level x , $P(x)$ denotes the number of individuals in the population whose dietary intake is at level x in the baseline scenario, $P'(x)$ denotes the number of individuals in the population whose dietary intake is at level x in the counterfactual scenario, X_b and X_c are, respectively, the sets of all possible values for x in the baseline and counterfactual scenarios.

To access the joint effects of changes to multiple dietary factors, we used a formula derived from the concept of PAF (Population Attributable Fraction) widely used in the GBD (Global Burden Diseases) study, as follows:

$$PIF_{joint} = 1 - \prod_{f=1}^M (1 - PIF_f)$$

Where f denotes each individual dietary factor, and M is a collection encompassing all the factors considered in the study. We assumed that dietary factors were independent and uncorrelated and the corresponding relative risks were mutually adjusted for potential confounding.

Finally, sensitivity analyses were performed to enable the prioritization of risk factors according to their contribution to global risk reduction or benefit gain. For each risk factor, we reported several metrics including that part of risk reduction that would be attributable to the factor and the part that would be avoidable if the factor had been removed.

Diet-Disease Relationships and Covariate Data

In this study, we set up the EpiDiet model using the values reported in a series of validated international meta-analyses published by a European team (Bechthold et al., 2019; Schwingshackl, Boeing, et al., 2017; Schwingshackl et al., 2018, 2019; Schwingshackl, Hoffmann, et al., 2017). We selected 12 diet-related factors (including the consumption of fruit, vegetables, nuts or seeds, whole grains, unprocessed red meats, processed meats, sugar-sweetened beverages, fish, dairy products, eggs, refined grains and legumes) and four diet-related diseases (including coronary heart disease, stroke, type 2 diabetes and colorectal cancer). The association between the diets and health endpoints was synthesized from epidemiological evidence, observational studies and randomized controlled trials, where bias from confounding was reduced and from which multivariable adjustments, factors with major overlapping effects or insufficient evidence for casual relationships were excluded, and the effect-size of food-disease associations was expressed in terms of relative risk for case-specific mortality. Finally, diet-disease relationships were described using a set of continuous non-linear dose–response functions. Each function was modelled by a restricted cubic spline (Gauthier et al., 2020), allowing the expression of a change in the risk of a disease for a unit increase in a dietary risk factor. Other covariates used were age, sex, and energy intake. The data were stratified by 5-year age bands and sex. Food intakes were supposed to be isocaloric and controlled over the total energy intake using the residual method (Willett et al., 1997).

Scenario Design

The baseline scenarios were derived from current food consumption observed during the most recent French survey: the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3) (Anses, 2017). Based on consumption, we broke down the foods into ingredients from the recipes and gathered them into food and beverage groups using the CIQUAL (French Data Centre on Food Quality) food composition database (CIQUAL, 2017). Energy intake estimates were derived from the same database. Under-reporting and over-reporting participants were identified by comparing their reported energy intake to the basal metabolic rate estimated using the Henry equation (Henry, 2005) and excluded according to the cut-off points proposed by Black (Black, 2000) with physical activity levels of 1.4, 1.6 and 1.8 for little active (sedentary), moderately active and active lifestyles, respectively (Salomé, Arrazat, et al., 2021). The dietary pattern of the baseline scenario corresponded to the daily average intake of each food and beverage group per capita in the sub-population.

The counterfactual scenarios were calculated from theoretical optimized diets (NFlex and Flex), as described in the Methods section of the manuscript. The optimized diets were obtained using a nonlinear optimization algorithm (NLP, with multistart to avoid local minima) under the OPTMODEL procedure (SAS 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.). The optimization problem was to find diets that maximized a health criterion based on dietary recommendations and at the same time deviated as little as possible from the observed diet while meeting all nutrient reference values, either strictly (non-flexible optimization, NFlex) or allowing some tolerance regarding the recommended intakes of bioavailable iron and zinc (flexible optimization, Flex).

Population Demographics and Cause-Specific Mortality

We used the French population observed in 2014 as the reference population, and generalized the scenarios formed above from INCA3 to the whole French population, using a standardized weighting method based on recalibration that accounts for sex, age, educational attainment, geographic location and type of eating in order to correct imbalances between the samples in the survey and the target population (Deville and Sarndal, 1992).

Data on population demographics and national disease-specific deaths were supplied by the National Institute of Statistics and Economic Studies (“Évolution et structure de la population en 2014 | Insee [Internet]”, 2019) and the Epidemiological Centre on Medical Causes of Death (“Classification internationale des maladies (CIM) | CépiDc [Internet]”, 2019), respectively.

Diseases were defined according to the International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems, Tenth Revision, including coronary heart disease (I20-I25), stroke (I60-I69), type 2 diabetes (E11,E14), and colorectal cancer (C18-20).

Estimate of Preventable DALYs Attributable to Dietary Factors

Disability Adjusted Life Years (DALYs) were estimated. The DALY is a normalized disease burden metric. It measures the number of years lost due to living with disease or dying before a predetermined life expectancy, and includes two components: the premature mortality component and the morbidity component. The premature mortality component (YLL-Years of Life Lost) is defined as the number of potential years of life lost due to premature death. YLLs are computed by multiplying the number of premature deaths at each age by a standard life expectancy at that age. In this study, the number of premature deaths was computed using the EpiDiet model and the standard expectation of life was extracted from the lifetables supplied by the GBD Group (ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool). The morbidity component is defined as the equivalent years of healthy life because of states of poor health or disability (YLDs). YLDs are estimated as the incidence of cases of different disease sequelae multiplied by the duration and disability weighting of each sequela. Our estimates of YLDs were calculated by multiplying the total YLLs by a conversion rate specific to age, sex and disease, which was calculated from the estimates provided by the GBD Group 2017 study via the GBD Results Tool (<http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool>). The use of a conversion rate made it possible to bypass the procedures for estimating disease duration as they are usually complex, requiring dynamic modelling and conservative assumptions (“A generic model for the assessment of disease epidemiology: the computational basis of DisMod II | Population Health Metrics | Full Text”, n.d.; Peterson and Flaxman, 2013).

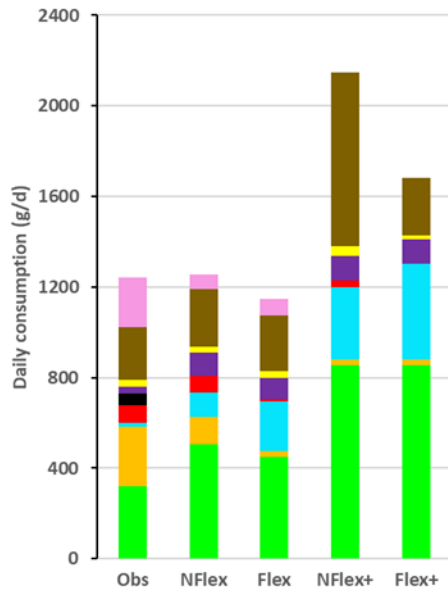
Furthermore, uncertainty analysis on measurement error was performed to evaluate the influence that variability of the diet-disease relative risk estimates due to sampling error has on the health impact of dietary changes. First, we estimated the probabilistic distributions of the actual relative risk using data reported in published meta-analyses, and then drew 100,000 stochastic simulations using Monte Carlo simulation. Each simulation was propagated to the health outcomes. The corresponding uncertainty intervals (UI) are based on the 2.5th and 97.5th percentiles of the outputs.

Estimate of DALYs Attributable to Iron Deficiency Anemia

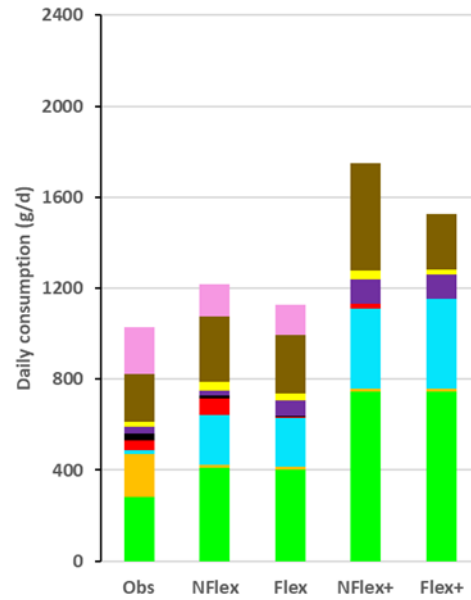
The risk of iron-deficiency anemia was first estimated for each scenario, and the DALYs attributable to this risk, including mild and moderate anemia, were then calculated from the estimated prevalence of iron-deficiency anemia using the standard expectation of life and the DALY disability weighting obtained from World Health Organization Health Statistics and Information Systems (www.who.int/healthinfo). The estimated prevalence of anemia in counterfactual scenarios was deduced from the estimated prevalence of anemia in the French population (0.2% for men aged 18-64 years, 2.8% for females aged 18-39 years, and 5.5% for females aged 40-54 years) (Environment, Biomonitoring, Physical Activity and Nutrition Health Study (Esteban 2014-2016). Nutrition Component. Chapter Bioassays: vitamins and minerals, 2019) and the bioavailable iron levels in the different scenarios, using a Monte Carlo simulation on 100,000 individuals, as described in the Methods section of the manuscript.

SUPPLEMENTAL FIGURE 1 Daily food category consumption in the observed diets (Obs) and modeled diets in males (panel A), females with “low-to-medium” iron requirements (Fe-)(panel B), and females with high iron requirements (Fe+) (panel C), using either the standard multicriteria optimization model (NFlex) or the goal programming option allowing flexibility regarding nutrient constraints for zinc and iron (Flex) and two complementary optimization models (without or with flexibility on bioavailable iron and zinc) when suppressing the *Diet Departure* term in the objective function (NFlex+ and Flex+, respectively)

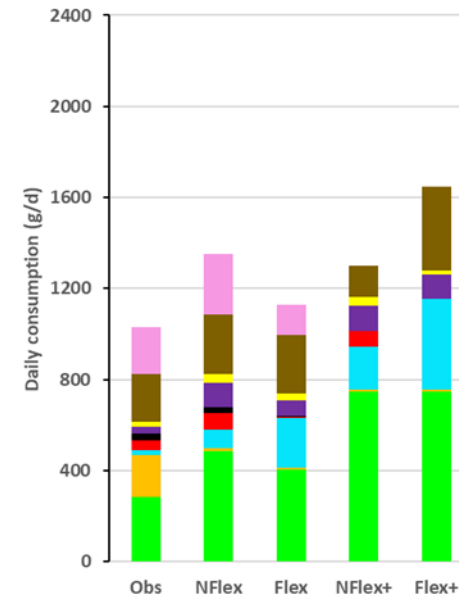
A. Males



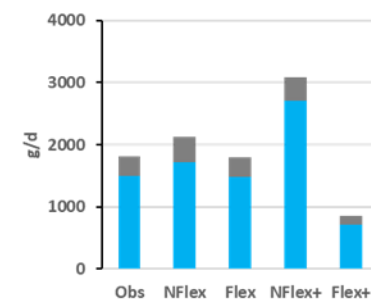
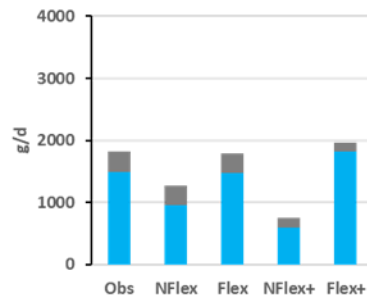
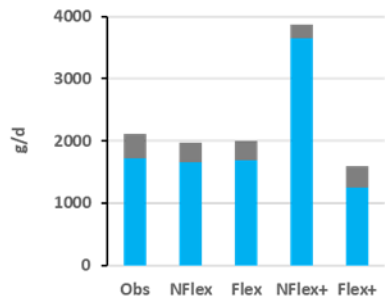
B. Females Fe-



C. Females Fe+



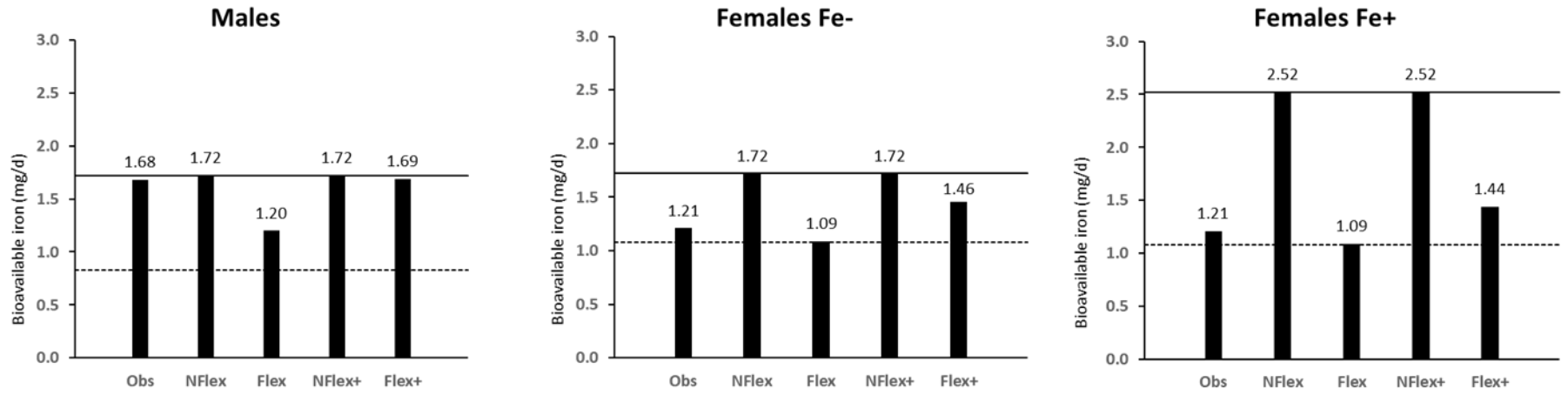
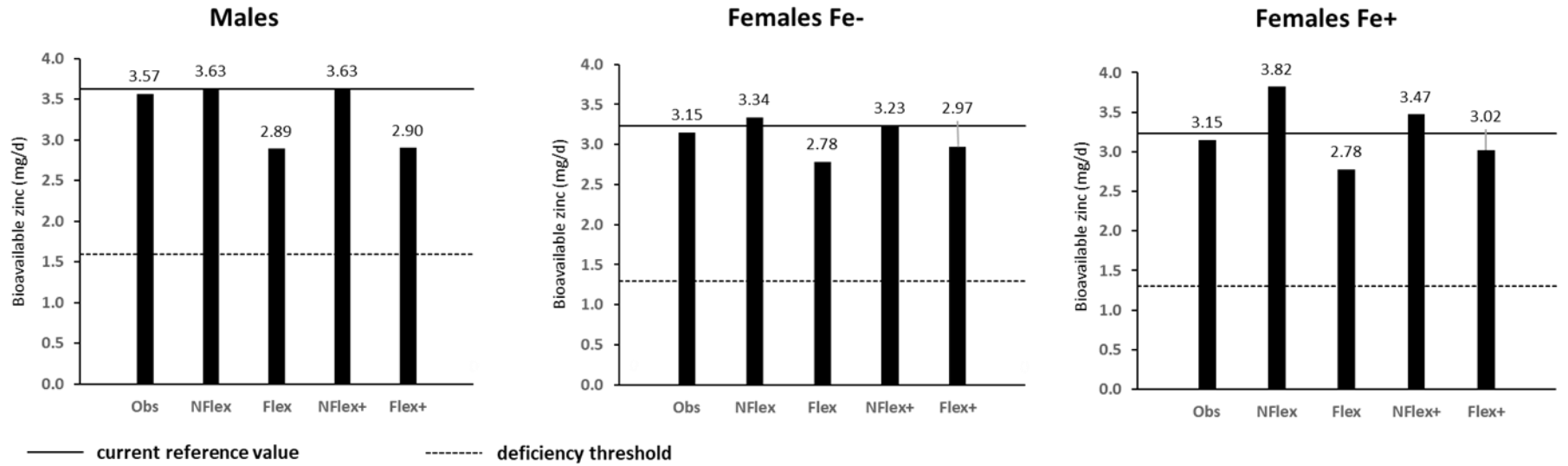
- Soft Drinks
- Dairy Products
- Fish
- Poultry
- Processed Meat
- Red Meat
- Whole Grain Products
- Refined Grain Products
- Fruit and Vegetables



- Others
- Other Drinks

SUPPLEMENTAL FIGURE 2 Amounts of absorbed iron (upper panel A) and absorbed zinc (lower panel B) under the observed diets (Obs) and modeled diets in males, females with “low-to-medium” iron requirements (Fe-), and females with high iron requirements (Fe+) using either the standard multicriteria optimization model (NFlex) or the goal programming option allowing flexibility regarding nutrient constraints for zinc and iron (Flex) and two complementary optimization models (without or with flexibility on bioavailable iron and zinc) when suppressing the *Diet Departure* term in the objective function (NFlex+ and Flex+, respectively)

The solid lines indicate the current reference values for the nutrient and population considered, which is used as the lower bound of the constraint in the NFlex and NFlex+ models, and broken lines indicate the deficiency threshold for the nutrient and population considered which is used as the lower bound of the constraint in the Flex and Flex+ models.

A**B**

References

1. 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.
2. Grieger JA, Johnson BJ, Wycherley TP, Golley RK. Evaluation of Simulation Models that Estimate the Effect of Dietary Strategies on Nutritional Intake: A Systematic Review. *J Nutr* 2017;147:908–31.
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. *The Lancet Elsevier*; 2019;393:447–92.
4. Murray CJL, Lopez AD. Measuring the Global Burden of Disease. *N Engl J Med* 2013;369:448–57.
5. GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet* 2020;396:1223–49.
6. Bechthold A, Boeing H, Schwedhelm C, Hoffmann G, Knüppel S, Iqbal K, De Henauw S, Michels N, Devleesschauwer B, Schlesinger S, et al. Food groups and risk of coronary heart disease, stroke and heart failure: A systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2019;59:1071–90.
7. Schwingshackl L, Boeing H, Stelmach-Mardas M, Gottschald M, Dietrich S, Hoffmann G, Chaimani A. Dietary Supplements and Risk of Cause-Specific Death, Cardiovascular Disease, and Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis of Primary Prevention Trials. *Adv Nutr* 2017;8:27–39.
8. Schwingshackl L, Hoffmann G, Lampousi A-M, Knüppel S, Iqbal K, Schwedhelm C, Bechthold A, Schlesinger S, Boeing H. Food groups and risk of type 2 diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *Eur J Epidemiol* 2017;32:363–75.
9. Schwingshackl L, Schwedhelm C, Hoffmann G, Knüppel S, Preterre AL, Iqbal K, Bechthold A, Henauw SD, Michels N, Devleesschauwer B, et al. Food groups and risk of colorectal cancer. *International Journal of Cancer* 2018;142:1748–58.
10. Schwingshackl L, Knüppel S, Michels N, Schwedhelm C, Hoffmann G, Iqbal K, De Henauw S, Boeing H, Devleesschauwer B. Intake of 12 food groups and disability-adjusted life years from coronary heart disease, stroke, type 2 diabetes, and colorectal cancer in 16 European countries. *Eur J Epidemiol* 2019;34:765–75.
11. Gauthier J, Wu QV, Gooley TA. Cubic splines to model relationships between continuous variables and outcomes: a guide for clinicians. *Bone Marrow Transplantation Nature Publishing Group*; 2020;55:675–80.
12. Willett WC, Howe GR, Kushi LH. Adjustment for total energy intake in epidemiologic studies. *Am J Clin Nutr* 1997;65:1220S-1228S; discussion 1229S-1231S.
13. The Third Individual and National Survey on Food Consumption (INCA3 Survey) [Internet]. The French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES); 2017 Jun p. 24. Available from: <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>

14. The ANSES-CIQUAL food composition table [Internet]. [cited 2021 Jun 22]. Available from: <https://ciqual.anses.fr/#>
15. Henry CJK. Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutr* 2005;8:1133–52.
16. Black AE. 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 Relat Metab Disord* 2000;24:1119–30.
17. Salomé M, Arrazat L, Wang J, Dufour A, Dubuisson C, Volatier J-L, Huneau J-F, Mariotti F. 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). *Eur J Nutr* 2021;
18. Deville J-C, Sarndal C-E. Calibration Estimators in Survey Sampling. *Journal of the American Statistical Association* [American Statistical Association, Taylor & Francis, Ltd.]; 1992;87:376–82.
19. Évolution et structure de la population en 2014 | Insee [Internet] [Internet]. 2019 [cited 2021 Apr 12]. Available from: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2862200>
20. Classification internationale des maladies (CIM) | CépiDc [Internet] [Internet]. 2019 [cited 2021 Apr 12]. Available from: <https://cepidc.inserm.fr/causes-medicales-de-deces/classification-internationale-des-maladies-cim>
21. A generic model for the assessment of disease epidemiology: the computational basis of DisMod II | Population Health Metrics | Full Text [Internet]. [cited 2021 May 18]. Available from: <https://pophealthmetrics.biomedcentral.com/articles/10.1186/1478-7954-1-4>
22. Peterson HM, Flaxman AD. Meta-regression with DisMod-MR: how robust is the model? *The Lancet* 2013;381:S110.
23. Environment, Biomonitoring, Physical Activity and Nutrition Health Study (Esteban 2014-2016). Nutrition Component. Chapter Bioassays: vitamins and minerals [Internet]. Saint-Maurice, France: French Public Health Agency; 2019 Dec p. 61. Available from: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/documents/rapport-synthese/etude-de-sante-sur-l-environnement-la-biosurveillance-l-activite-physique-et-la-nutrition-esteban-2014-2016-.volet-nutrition.-chapitre-dosages>

II.2. Projet n°2 : Freins nutritionnels et leviers diététiques lors de la baisse de la consommation de viande : une étude d'optimisation des régimes alimentaires des adultes français (INCA3)

a. Résumé

Contexte : Dans les pays occidentaux, la baisse de la consommation de viande est une tendance actuelle et une prospective forte, mais ses modalités diététiques et ses conséquences nutritionnelles restent mal documentées.

Objectifs : Par une étude d'optimisation, nous avons cherché comment des régimes comportant de moins en moins de viande pourraient être sains et nutritionnellement adéquats, afin d'analyser les freins nutritionnels et les leviers diététiques lors de ces transitions.

Méthodes : A partir des consommations des adultes français (INCA3, $n = 1\,125$, 18-64 ans), nous avons modélisé des transitions douces (les plus respectueuses possibles des autres habitudes alimentaires) vers des régimes plus sains (favorisant la consommation de céréales complètes, légumes et fruits et limitant la consommation de viande rouge, charcuterie et boissons sucrées), qui débouchent progressivement vers la suppression de toute viande (par étapes successives de 10% de baisse). Les régimes devaient couvrir les références nutritionnelles les plus récentes de l'Anses pour chaque sexe, en tenant compte de la biodisponibilité. Cette optimisation non linéaire et multi-critère a été menée sous SAS[®], et les 35 contraintes nutritionnelles ont été normalisées pour être classées de la plus à la moins limitante. Suite aux travaux préliminaires, les références d'apport en fer et zinc biodisponibles parfois trop contraignantes ont été abaissées à un seuil de sécurité limitant la prévalence de carence à 5%.

Résultats : Lors des transitions ainsi obtenues par sexe, les changements diététiques les plus significatifs survenaient précocement. Les viandes étaient rapidement redistribuées, avec des baisses drastiques ou des suppressions de la charcuterie, du porc et de la viande rouge au profit d'une importante augmentation de la volaille. La volaille devenait ainsi la viande dominante dès l'étape 10% de baisse de viande, puis était progressivement diminuée lors de la seconde partie de chaque transition (étapes 50% à 100%). Les fruits, légumes et céréales

complètes augmentaient aussi rapidement, avant de stagner en seconde partie. Au niveau nutritionnel, certaines contraintes limitaient l'obtention de régimes encore plus sains, mais le maintien d'apports suffisants en nutriments et notamment en vitamine A, fer et zinc au cours des transitions était assuré par l'augmentation d'autres vecteurs que la viande. Des nutriments auxquels la viande contribuait initialement beaucoup, comme les vitamines B6 et B12, les protéines et AAI, étaient fournis en quantités très supérieures aux références nutritionnelles.

Conclusion : Nous avons identifié des régimes sains, conformes aux profils diététiques favorables à la santé et nutritionnellement sûrs, jalonnant des transitions alimentaires de baisse de viande jusqu'à suppression. Au-delà de 50% de réduction, la seule viande subsistante est la volaille (50-80 g/j selon le sexe) dont la suppression ultérieure est moins efficace pour améliorer le profil diététique, mais un régime sain sans viande est atteignable.

Valorisation : Ce travail a été soumis dans la revue *Clinical Nutrition* le 4 mai 2022.

b. Messages-clés

Messages-clés

- Chez les deux sexes, il a été possible d'identifier des régimes sains, caractérisés par des profils diététiques favorables à la santé et nutritionnellement sûrs, jalonnant des transitions alimentaires de baisse de viande jusqu'à suppression.
- Au-delà de 50% de réduction, la seule viande subsistante était la volaille (3 à 4 portions/semaine selon le sexe), et les réductions suivantes étaient moins efficaces pour améliorer le profil diététique.
- La vitamine A, ainsi que le fer et le zinc biodisponibles étaient les nutriments les plus limitantes eu égard à la baisse de la viande, parce qu'il a fallu trouver des leviers au fur et à mesure de la baisse de la viande.
- Les contraintes relatives aux vitamines du groupe B, aux protéines et au sélénium n'étaient jamais limitantes.
- Les apports en acides aminés indispensables dans les régimes modélisés sont suffisants en quantité pour couvrir les besoins, y compris en fin de trajectoire.

c. Article et données supplémentaires

Nutritional issues and dietary levers during gradual meat reduction – a sequential diet optimization study to achieve progressively healthier diets

Alison Dussiot¹, H el ene Fouillet¹, Elie Perraud¹, Marion Salom e¹, Jean-François Huneau¹, Emmanuelle Kesse-Guyot², François Mariotti¹

¹ Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 91120, Palaiseau, France

² Université Sorbonne Paris Nord, Inserm, EREN, CRESS, 93017, Bobigny, France

Corresponding author: Professor François Mariotti, 22 place de l'Agronomie, 91120, Palaiseau, France, francois.mariotti@agroparistech.fr

Short title: Nutrient challenges when reducing meat consumption

List of abbreviations

AA, Amino Acids

ANSES, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety

DD, Diet Departure

EAR, Estimated Average Requirement

HDP, Healthy Dietary Pattern

Abstract

Background & Aims: Reducing meat consumption is a current trend and a strong prospect for the future in Western countries, but its dietary modalities and nutrient challenges remain poorly documented. Using diet optimization under a broad set of constraints, we tried to identify a sequential meat reduction transition and analyze its nutrient issues and dietary levers.

Methods: Based on the consumption of French adults (INCA3, $n=1\ 125$, 18-64 years old), we modeled a transition towards a nutritionally adequate healthy dietary pattern under the constraint of a gradual reduction in meat consumption in successive 10% steps. Using a multi-criteria optimization procedure, the diet modeled at each meat reduction step was to be healthier but close to the previous diet.

Results: The most significant changes occurred early in the modeled transition process, with drastic reductions in processed and red meats in favor of poultry, which rapidly became the predominant meat before gradually decreasing from 50% to 100% meat reduction. At the same time, whole grain products, fruits and vegetables consumption increased rapidly to reach a plateau from 50% meat reduction onwards. Some nutrients were limiting, in particular bioavailable iron and zinc, and vitamin A, but sufficient intakes were achieved by restructuring diets based on food groups other than meat. Other nutrients mainly supplied by meat such as vitamin B6 and B12, protein and indispensable amino acids, were never limiting.

Conclusion: Healthy and nutritionally adequate food patterns can be identified throughout a transition to complete meat reduction. After a 50% reduction in meat consumption, poultry is almost the only meat remaining and its further reduction makes the diet only marginally healthier.

Keywords: diet optimization; healthy dietary patterns; gradual meat reduction; nutrient adequacy; dietary habits

Introduction

Plant-based diets have consistently been associated with long-term health, i.e., a lower risk of chronic diseases (1–4). Several variants of these healthy and sustainable diets have been identified using different approaches such as the Mediterranean diet (5), the "new Nordic diet" (6) and the EAT-Lancet diet (4), which mainly involve a high consumption of plant-based products and a moderate to no consumption of meat. These diets generally contain less saturated fatty acids (SFA) and sodium, and are more nutritionally adequate than current Western diets for a number of nutrients such as fiber and folate (7–9). For many other nutrients, achieving adequate nutrient intakes may become more challenging as the proportion of animal products diminishes (10–12). In Western countries, a reduction of meat consumption is a current trend in some subgroups of the population (13) and a strong prospect for the years to come (14). This trend can be explained by concerns regarding human health, animal welfare and the environment, amongst others (15–19). Meat, and especially processed meat, contributes to intakes of SFA and sodium (20,21), and its reduction could help to reduce excessive intakes of these nutrients (22). However, meatless diets raise some specific nutrient issues. Meat and especially offal are important sources of protein and indispensable amino acids (AA) (23) and supply essential minerals and vitamins such as iron, zinc, selenium and vitamins A, B6 and B12, for which some insufficient intake and/or deficiency has been documented in adults (24–27). The bioavailability of some of these nutrients is generally lower under plant-based diets than animal-based diets (28); e.g. in individuals with adequate iron status, heme iron in meat is much more bioavailable than non-heme iron in plant-based products (29,30). Meeting nutritional reference values with a diet containing less meat may thus be challenging regarding a number of these nutrients (31,32). Based on the current trend to reduce meat consumption and the paucity of data in the literature to rigorously evaluate the dietary characteristics of low-meat or meat-free diets that would render them nutritionally adequate, data are required to understand which changes in the diet, as close as possible to dietary habits, should be made when decreasing meat consumption to maintain or improve diet quality (33–37). Our objective was therefore to design diets involving a gradual reduction in meat in order to identify the

most salient nutrient issues and possible efficient dietary levers, i.e. the food groups for which changes in consumption would supply these limiting nutrients while also aligning with improvement in the dietary pattern.

Methods

Input data

We used food consumption data on males (n=564, 18-64 years old) and pre-menopausal females (n=561, 18-54 years old), not identified as under-reporters, in the French INCA3 national study conducted in 2014-2015 (Supplemental Figure 1). The survey design and methods have been described in full elsewhere (38,39). The socio-demographic characteristics and lifestyles of the study population are presented in Supplemental Table 1. Briefly, food and beverage intakes were assessed using three unannounced non-consecutive 24h-dietary recalls collected by trained interviewers assisted by dietary software. Portion sizes were estimated using validated photographs (38). Nutrient intake was calculated using the 2016 nutritional composition database from the French Centre d'Information sur la Qualité des Aliments (CIQUAL) (40). Food items (n=1 533) were categorized into 45 food groups (31) (Supplemental Table 2). Food group consumptions were calculated at the population level for males and females separately. For each sex, the nutrient content of each food group (41 nutrients) was calculated, as the mean nutrient content of food items constituting the food group weighted by their respective contributions to the food group consumption in the considered sex (32). In order to check that adequate intakes of indispensable AA were maintained in the modeled diets, we used a database on the AA composition of foods, collecting published French analyses and international databases and thus extending our previous database (41) (Supplemental Method 1).

Multi-criteria diet optimization

To address the issue of diet optimization, where the decision variables were the daily intakes of 45 food groups, we used multi-criteria optimization to identify an optimized diet with a maximal health

profile and minimal deviation from the current diet, under the constraint of covering sex-specific nutrient references, using the OPTMODEL procedure under SAS software (SAS Institute®, Inc., Cary, NC, USA, version 9.4). The HDP (Healthy Dietary Pattern) criterion sets dietary objectives based on epidemiological studies that have evaluated associations between food group consumption and chronic disease risk (32,42) as used to prepare French dietary guidelines (43). It consisted in reducing the consumption of red meat (including beef and veal, pork and other meats, and offal), processed meat and soft drinks while increasing the consumption of vegetables, fruits and whole grain products. The HDP criterion was expressed and maximized as follows:

$$\text{Max } HDP = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\text{Opt}(i)}{\text{P95}(i)} \right] - \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\text{Opt}(j)}{\text{Max}(j)} \right]$$

where i denotes the food groups to be increased (vegetables, fruits, and whole grain products), j denotes the food groups to be decreased (red meat, processed meat and soft drinks), $\text{Opt}(i)$ and $\text{Opt}(j)$ are the optimized intakes of food groups i and j , respectively (in g/d), $\text{P95}(i)$ is the current 95th percentile intake of food group i (in g/d), and $\text{Max}(j)$ is the upper limit of intake for food group j (in g/d). The upper limit of intakes for red meat, processed meat and soft drinks were 71, 25, and 263 g/d, respectively, as defined by the French Agency for Food, Environmental, and Occupational Health Safety (ANSES) (43).

The DD (Diet Departure) criterion is used to minimize deviation from the observed diet in order to account for dietary inertia (44). The DD criterion was expressed and minimized as follows:

$$\text{Min } DD = \sum_{k=1}^n \left[\frac{\text{Obs}(k) - \text{Opt}(k)}{\text{SD}(k)} \right]^2$$

where k is the number of food groups, $\text{Obs}(k)$ and $\text{Opt}(k)$ are the observed and optimized consumptions of food group k (in g/d), respectively, standardized by dividing by $\text{SD}(k)$, the current standard deviation of the consumption of food group k .

As some food groups were considered to be more easily substitutable, they were grouped together in the same food group k in DD so that the substitutions within the following groups would not weight

DD: fruits (fresh/dried/processed), breads (refined/whole grain), other starch-based products (refined/whole grain), vegetable fats (low/high in α -linolenic acid), meat (poultry/red meat, excluding offal), soft drinks (drinks with added sugars/fruit juices), fish (fatty/lean), fresh dairy products (natural/sweetened), and soups/bouillons.

The optimization procedure consisted in maximizing HDP while minimizing DD without specific weighting (1:1), as previously performed by us (32) and before that by the ANSES (31,43). With this scalarization method (weighted sum method with equal weights for HDP and DD), the identified solution corresponded to the best compromise between a healthier diet and a diet as close as possible to the current one, by considering these two objectives as being of equal importance (45).

Nutritional and acceptability constraints

To ensure the nutritional adequacy of the modeled diets, we used a set of nutritional constraints related to 35 nutrients, presented in Table 1 and in Supplemental Table 3. These sex-dependent constraints were based on the ANSES 2016 reference values (26). We also constrained total energy intake within $\pm 5\%$ of the estimated mean energy intake of the French INCA2 national study conducted in 2006-2007 (2600 kcal for males and 2100 kcal for females) (46). One exception was vitamin D, for which we did not set any lower constraint because the reference value is known to be far too high to permit a solution from diet optimization (31,32).

For iron and zinc, reference values were based on bioavailable iron and zinc calculated from dietary intakes using equations to predict their absorption, as detailed in a previous work by our group (32). Regarding the nutrient constraints for bioavailable iron and zinc, we used threshold values lower than current reference values, corresponding to a deficiency prevalence of 5% in each sex (Table 1 and Supplemental Table 3), because such flexibility would enable the identification of diets being apparently healthier overall, with a better balance in terms of Disability Adjusted Life Years (DALYs) averted due to less cardiometabolic disease despite a higher prevalence of iron-deficiency anemia (32). As previously performed again (32), flexibility for bioavailable iron and zinc was introduced by adding

in the objective function, in addition to its HDP and DD terms, two goal variables that would minimize any violation of these relaxed nutrient constraints. The reference values used as goals were set for bioavailable iron at 1.72 mg/d for both sexes and for bioavailable zinc at 3.63 mg/d for males and 3.23 mg/d for females (26,31). An alternative scenario without flexibility on bioavailable iron and zinc (i.e., with bounds set at current references values, and without goal variables) was also tested. In addition, to take account of the poorer digestibility of plant proteins, a 5% penalty was applied to protein intake from plant protein food items, as previously described (47). Dietary constraints were also applied to the food groups included in the HDP criterion where consumption was to be reduced: red meat (beef and veal/pork and other meats/offal), processed meat and soft drinks (soft drinks/fruit juice) were limited to the max values used in the HDP criterion of 71 g/d, 25 g/d, and 263 mg/d, respectively (43). Finally, in order to take account of French dietary guidelines on fish consumption (48), we added two additional constraints to limit total fish consumption to 39 g/d and oily fish consumption to 26 g/d. Furthermore, acceptability constraints were used to keep the modeled intakes by food group within the range observed for each sex (Supplemental Table 4). The acceptability constraints included lower and upper values that corresponded to the 5th or 95th percentiles of consumption for all food groups except those with an upper limit set as a dietary constraint (red meat, processed meat and soft drinks). In the same way as for the DD criterion, the most substitutable food groups in the acceptability constraints (see above) were grouped together to define their lower and upper bounds as the 5th or 95th percentiles of their total consumption. As some values were sex-dependent in both the nutritional and acceptability constraints and also in the HDP and DD criteria, optimization was performed at the population level for males and females separately.

Gradual meat reduction constraint

Total meat consumption (poultry, red meat and processed meat) was constrained to be diminished by at least x% of its observed value in a stepwise manner, with x taking successive values of 10%, 20%, 30%, etc. to reach meat-free diets (x=100%). In addition, we forced a non-degradation constraint of

the HDP criterion, so that it could only increase or remain the same from one step to another along the transition. Adding this constraint made it possible to estimate what additional HDP gain could be achieved in the final steps of meat reduction until its elimination, where high DD costs were required for small HDP gains. It was also needed to make sure that the diets were progressively healthier. At each step, DD was calculated with reference to consumption at the previous step.

Standardization of constraints to compare their relative influences

We estimated the dual values associated with each constraint, i.e., the potential gain in the objective function that would result from relaxing the limiting bound of the considered constraint by one unit. All constraints were standardized on the value of their limiting bounds (49), so that the standardized dual values (representing the effect of a 100% relaxation of the limiting bound) could be compared numerically with each other, and the limiting constraints for nutrient and food group intakes could be classified from the most to the least limiting, as previously explained (32).

Results

Changes to dietary patterns and objective values during the transition towards less meat

Modeled diets could be identified (i.e. solutions could be found) at each step of the meat reduction transition in both sexes (Figure 1). Compared to the observed diet, the modeled diets were increasingly healthier along the transition (i.e., increasing HDP), with more fruits and vegetables alongside a considerable substitution of refined grain products with whole grain products and a reduction in red meat, processed meat and soft drinks (Figure 1 and Supplemental Table 5). These dietary changes occurred very early and gradually during the first half of the transition before slowing down, with dietary patterns remaining generally much more stable from 50% to 100% of meat reduction (Figure 1).

At the first step, total meat consumption decreased more than the imposed constraint: reductions of 20% in females and more than 30% in males were thus obtained when a reduction of at least 10% was

required at that point. The meat reduction constraint was not active and had no influence on the modeled diets (i.e., the modeled diets were the same whether this constraint was considered or not). The meat reduction constraint only became active (i.e., limiting) at the 20% step in females and 40% step in males, where the effective reductions in total meat consumption were then equal to their prescribed values (Supplemental Table 6). When optimizing according to the DD criterion only (no optimization on the HDP criterion), and in order to determine the optimized diet closest to the observed diet ensuring nutrient adequacy, meat was similarly reduced by 20% in females and 30% in males (results not shown). Furthermore, from the first step of the meat reduction transition, there was a redistribution within meats that involved the drastic reduction or elimination of red and processed meats that was offset by a significant increase in poultry consumption (considered substitutable for red meat without impacting DD), which became the predominant meat consumed from the 10% step and subsequently (Figure 2). Regardless of sex, the 50% meat reduction step still retained a relatively high level of poultry (48 to 78 g/d, i.e. ~ 3 to 4 servings of 120 g per week) (Supplemental Table 5), but poultry was then gradually and linearly reduced during the second half of the transition (Figure 2). The most notable improvements in the HDP criterion were achieved early in the transition, with large HDP gains associated with small DD costs during the first steps of meat reduction (Figure 3). From the point where the HDP/DD yield was falling sharply, little additional HDP gain was achieved by subsequent dietary changes that mainly consisted in a gradual reduction of poultry consumption (whereas the overall dietary pattern remained globally stable through to the end). As from a 50% meat reduction, the HDP criterion reached 85-90% (depending on sex) of its maximal value finally achieved with meat-free diets. At that point, fruit and vegetable consumptions (among the groups to be promoted under HDP) reached their 95th percentiles of consumption (i.e., the upper bounds of the acceptability constraints) and the food groups to be reduced were nearly removed (Supplemental Tables 4 and 5). Late transition changes involved food groups with smaller inter-individual variations in the observed diet (i.e., with lower SD present in the denominator of the DD criterion), corresponding

to DD increases that were not always apparent in our diet representations by food family grouping (Figures 1 and 3 and Supplemental Table 7).

Changes to nutrient intakes and nutritional adequacy

By construction, the intakes of sodium, SFA, and sugars (excluding lactose) which were excessive with the observed diets (the latter in males only), were reduced under all modeled diets, while remaining stable at or near their upper allowed reference values (Table 1). Reciprocally, the intakes of vitamin C, linoleic acid, α -linolenic acid, EPA, DHA, fiber, vitamin A, iodine and potassium, which were insufficient in the observed diets (the latter three in females only), were increased above their reference values (Table 1).

Bioavailable iron and zinc were below their current reference values at all steps in meat reduction (with variations ranging from -33 to -24% for bioavailable iron and -25 to -11% for bioavailable zinc over the transition and in both sexes), but by construction they were above their safety thresholds, thus ensuring a prevalence of deficiency <5% (Table 1).

In models without flexibility on bioavailable iron and zinc that were set at their current nutritional references, these two nutrients were the most limiting from the start of the transition and even blocking at the end, since we were able to identify diets reaching 70% meat reduction (but no higher) in both sexes (Supplemental Figure 2). By contrast, in our main analysis with flexibility on bioavailable iron and zinc, the model converged up to full meat removal, and these two nutrients were no longer the most limiting.

Sodium, linoleic acid, α -linolenic acid, EPA, DHA, and sugars (excluding lactose) were limiting nutrients in both sexes and at all steps of meat reduction (except EPA and DHA that were not limiting at some steps in males) (Table 1). Vitamin C, vitamin A, iodine, SFA, and fiber were also limiting in both sexes, but only at some early meat reduction steps, except for vitamin A that became limiting again during the final steps in males (Table 1). Bioavailable iron and potassium were limiting at some early steps in females only (Table 1). In terms of relative importance, sodium was always the most limiting nutrient

whatever the sex and transition step (except in the 40%, 50%, and 100% meat reduction steps in males), often followed (and sometimes surpassed in males) by sugars excluding lactose (Supplemental Table 8). Vitamin A was limiting less frequently, except in the final transition steps in males (from the 70% step onwards) where it was the second most limiting nutrient after sodium.

Group B vitamins (and particularly vitamins B6 and B12), protein and selenium were never limiting (Supplemental Table 3), and their intakes were maintained above reference values throughout the transition to meat-free diets (Supplemental Table 3). Intakes of protein and indispensable AA were much higher than their current reference values, including with the meat-free diets (Supplemental Table 9).

Changes affecting food group contributions to nutrient intakes

We examined the contributions of each food group to nutrient intake for nutrients that were limiting, or where meat was a significant source in the observed diets (contributing to >10% of nutrient intake). In the observed diet, meat contributed notably to the intakes of bioavailable iron (38-47%, depending on sex), bioavailable zinc (36-43%), vitamin A (16-28%), vitamin B12 (34-43%), vitamin B6 (26-29%), protein (33-37%) and selenium (10-12%), but very little to iodine intake (4-6%).

In the modeled diets, as the animal food groups other than meat (seafood, dairy products and eggs) were maintained or increased while meat was reduced (Figure 1), they played an increasing role in the intake of some nutrients such as bioavailable iron and zinc, vitamins A and B12, and iodine as the transition progressed (Figure 4 and Supplemental Figure 3). Concerning bioavailable iron and zinc, the contribution of seafood thus increased during the second half of the transition. Nevertheless, during the late transition steps of high meat reduction, the sum of animal food groups only achieved modest contributions to bioavailable iron (23-24%) and bioavailable zinc (38-43%), and more than half of the bioavailable iron and zinc were supplied by plant-based food groups, although the absorption of non-heme iron and zinc was impaired by the increase in phytate which mainly came from whole grain products. Therefore, comparing the observed and meat-free diets, iron and zinc intakes were globally

maintained (at around 12-13 mg/d and 9-10 mg/d, respectively) but their absorption rates decreased (from 13% to 9% and from 34% to 28%, respectively) (Supplemental Table 10).

The vitamin A intake was equal to or slightly higher than its reference value, as a function of meat reduction step (Table 1 and Figure 4). With meatless diets, vitamin A was mainly supplied by fruit and vegetables which contributed to ~54% of its intake in meat-free diets (vs. ~23% in observed diets).

Intakes of vitamin B12, protein, vitamin B6, and selenium were well above their reference values (Supplemental Table 3). For vitamin B12, the contribution of seafood increased during the first half of the transition, effectively taking over from meat to ensure an adequate intake (Figure 4). For protein, vitamin B6 and selenium, plant-based food groups were good dietary levers whose gradual increases contributed to maintaining adequate intakes until meat-free diets were reached (Figure 4 and Supplemental Figure 3).

Discussion

In this work we identified a dietary transition of meat reduction that consisted in a series of modeled diets which were nutritionally adequate and consistent with healthier dietary patterns. Beyond a 50% meat reduction, subsequent reductions were much less effective in improving the healthiness of the dietary profile, but a healthy meat-free diet could be identified in both sexes. Except for vitamin D and bioavailable iron and zinc, all nutrients with insufficient intakes under the observed diet (vitamin C, linoleic acid, α -linolenic acid, EPA, DHA, and fiber, as well as vitamins A and B6, folate, calcium, iodine, and potassium in females) reached reference values under the modeled diets. One important finding is our identification of limiting nutrients which may constitute nutritional issues during gradual meat reduction, and the dietary levers identified as food groups in which changes would supply these limiting nutrients while also improving the dietary profile. In our study, limiting the sodium intake to its upper limit appeared to strongly determine dietary solutions at each step, as is often the case in diet optimization, but reducing meat consumption contributed to these solutions (50). Likewise, reducing red and processed meats in favor of poultry ensured lower and more appropriate levels of SFA, as soon as the first step of meat reduction. Before 20% meat reduction in females and 40% in

males, the reduction of meat in the modeled diets was stronger than that required, which means that reducing meat was not limiting at those steps of the transition and was indeed useful for modeling healthy and nutritionally adequate diets. Throughout the transition, nutritional constraints limited the identification of diets that could be more consistent with the optimization objectives (i.e., diets that could be both healthier and remain close to observed diets), but many of the limiting nutrients were not supplied by meat, such as iodine or fiber which were limiting as soon as during the first steps of the transition. The dietary solutions we identified involved increasing food groups that are sources of these nutrients. By contrast, some nutrients largely contributed by meat proved to be an issue: bioavailable iron and zinc and vitamin A. It was possible to reach sufficient intakes of these nutrients during the transition by reorganizing the diets using food groups other than meat (fruits and vegetables, whole grain products and seafood). Other nutrients to which meat was initially a major contributor, such as vitamins B6 and B12, protein and indispensable AA, were supplied in ample amounts in all the modeled diets.

Another important finding was that an improvement in alignment with a healthy dietary pattern (HDP criterion) was very effective during the first steps of the transition, with virtually full alignment at the 50% meat reduction step (where fruits and vegetables had already reached their maximal allowed values set at the 95th percentile of their current observed consumptions). At this step, meat intake consisted almost exclusively of poultry, in much larger quantities than in the observed diets. Given that red meat and processed meat tend to be reduced in order to comply with the objective set in the HDP criterion, it was expected that scenarios of reducing meat intake would favor poultry. Indeed, in the literature, poultry has been shown to be a healthier alternative to red and processed meats when considering the risk of chronic diseases (51,52). A further reduction in meat intake, once mostly replaced by poultry (i.e., from 50% of meat reduction), proved to be limiting in the identification of better diets, which means that poultry is useful to optimize diets, and particularly as a source of bioavailable iron and zinc during the first half of the transition only. Of note, the fact that red meat was substituted by poultry rather than by plant foods that may be effective dietary levers, such as

legumes, could be ascribed in part to the weight we gave to dietary inertia, favoring internal substitutions between meats. We considered that, when decreasing total meat, it was more acceptable/feasible than increasing very different food groups which are little consumed presently. Therefore, our results do not mean that legumes and other plant protein sources that are nutrient-dense could not be important for reducing meat if more disruptive dietary shifts are considered.

The few studies which aimed to prospectively identify modeled diets with both health-promoting dietary patterns and relatively low meat consumption used methods other than optimization, such as modeling the substitution of meat with alternatives (53,54). Overall, our results were consistent with a previous observational study conducted on the same population which simulated partial or total meat replacement with plant-based substitutes, inasmuch as it was found that substitutions also led to diets that were more adequate for fiber, linoleic acid, α -linolenic acid, folate, and SFA, but with lower levels of bioavailable iron and zinc (53). That study also reported a reduction in the adequacy of vitamin B12 and riboflavin intakes, whereas in the present study they were maintained above their reference values in all modeled diets (+20% minimum throughout the transition in both sexes). This difference was due to the fact that in the previous and specific substitution modeling study, the meat substitutes were low in vitamin B12 and riboflavin whereas the present study showed that remodeling of the diet during the sequential optimization process toward a healthier dietary pattern supplied those vitamins in quantities similar to or even higher than those resulting from the reduction in meat consumption. Restructuring the entire diet was thus clearly more efficient than using simple selective substitutes for meat.

Uncertainties remain regarding the estimated physiological reference values for iron and zinc and the resulting reference values (32,55). In a previous work, we had shown that the current high reference values for bioavailable iron and zinc tend to limit the overall health benefits of a healthier dietary pattern (32). Accordingly, in order not to over-determine the model in the present work, we did not impose the current reference values for bioavailable iron and zinc but lower minimum threshold values that would secure an acceptable level of these nutrients in the population (with an overt deficiency

prevalence <5%) and add a goal in the objective to favor values above this lower threshold and as close as possible to the reference values. With this flexibility, the amounts of bioavailable iron and zinc remained relatively high, except in females where bioavailable iron levels in the modeled diets were close to the lower threshold, which would correspond to a prevalence of iron-deficiency anemia similar to that currently observed (4.1%) (56).

Our study has revealed the existence of dietary levers for low-meat or meat-free diets that do not jeopardize nutrient adequacy. We found alternate contributors for vitamin A, mostly fruits and vegetables. Less expected was the finding regarding levers for bioavailable iron and zinc during the transition since meat, and especially red meat, is rich in heme iron which is 2 to 3 times more bioavailable than the non-heme iron found in plant-based foods (29,57). Solutions consisted in increasing intakes of plant-based foods (fruits, vegetables, whole grain products and legumes) and seafood, although plant foods also increased the intake of phytate, a potent inhibitor of non-heme iron and zinc absorption (28,58). Indeed, the fractional absorption rates for iron and zinc were lowered in the model compared to the initial observed diets, but their intakes were maintained or increased during the transition, despite early and drastic reductions due to red and processed meats. These results are consistent with other published studies which reported that although vegetarians have lower iron stores, any adverse health effects of lower iron and zinc absorptions have not been demonstrated with the varied, plant-based diets consumed in high-income countries (59–61).

On the other hand, our study also revealed nutrients largely contributed by meat in the observed diets that were not at issue during the modeled transition. In particular, we have shown that a combination of protein sources other than meat could achieve high levels of protein and indispensable AA, including lysine and methionine. This was in line with other studies which concluded that even when eating a diet of limited variety, significant amounts of total protein could be obtained from a high intake of plant foods that are low in protein, including fruits and vegetables (62), and that total protein and indispensable AA intakes from low-meat diets are apparently sufficient for adults in Western countries (63,64).

During the second part of the transition, when poultry intake was reduced, animal food groups (seafood, dairy products and eggs) were maintained or increased but the quantities never reached their maximal allowed values, except for the "Mollusks and crustaceans" food group where quantities reached their 95th percentile of consumption in both sexes. At the 100% meat reduction step, the modeled diets corresponded to pesco-lacto-ovo-vegetarian diets. With the exception of meat, we imposed staying within the observed sex-specific ranges of consumption, but it is possible and perhaps necessary to explore other potential diets that might depart further from these ranges (i.e. exceeding the 95th percentiles of consumption for some food groups) in order to describe other low-meat or semi-vegetarian diets, as has been done during previous studies (50,65).

Strengths and limitations

Our multi-criteria approach to diet optimization considered a wide range of nutrients, including bioavailable iron and zinc, and the relative digestibility of protein. Our study was based on observed diets in French adults with similar background intakes – although somewhat higher in meat – and similar reference values when compared to other Western countries (26). One limitation is that we only studied one transition for each sex and in a wide age range (18-54 years old for females, and 18-64 years old for males), and this population-level optimization does not account for variations in the observed starting diets that might, for example, originate from the socioeconomic characteristics of the population, which may warrant further detailed studies.

Conclusion

We have identified a possible dietary transition from current relatively meat-rich Western diets to nutritionally adequate and healthier diets involving a gradual reduction in meat consumption. Healthy dietary patterns, which include only poultry as meat, were identified from a 50% meat reduction and onwards. This study demonstrates that it is possible to reduce the share of meat in the diet, and even remove it totally, without jeopardizing nutrient security (provided that the diets are properly

structured). It thus offers nutritional and dietary lessons on transitions toward healthy diets that are low in meat. Nutrients whose intake was largely contributed by meat in the observed diets, such as total protein, indispensable AA and vitamin B12, were not a limiting factor for the reduction in meat consumption, but when remodeling diets, it was necessary to find adequate sources of bioavailable iron and zinc and vitamin A.

Acknowledgments

This research received no external funding.

AD, HF, EK-G, and FM: designed the research; AD, HF: conducted the research; AD, HF, EK-G, and FM analyzed the data; MS, EP, and J-FH provided methodological support; AD drafted the first version of the manuscript, AD, FM and HF wrote the manuscript and all authors provided critical comments on the manuscript. AD and HF had primary responsibility for the final content, and all authors read and approved the final manuscript.

MS's PhD fellowship was funded until October 2021 in part by a research contract with Terres Univia, the French Interbranch organization for plant oils and proteins. FM was the scientific leader of this contract. The other authors report no conflicts of interest.

References

1. Hemler E, Hu F. Plant-Based Diets for Personal, Population, and Planetary Health. *Advances in Nutrition* 2019;10:S275–83.
2. Keaver L, Ruan M, Chen F, Du M, Ding C, Wang J, Shan Z, Liu J, Zhang FF. Plant- and animal-based diet quality and mortality among US adults: a cohort study. *British Journal of Nutrition Cambridge University Press*; 2021;125:1405–15.
3. Medawar E, Huhn S, Villringer A, Veronica Witte A. The effects of plant-based diets on the body and the brain: a systematic review. *Transl Psychiatry* 2019;9:226.
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. *The Lancet* 2019;393:447–92.

5. Trichopoulou A, Martínez-González MA, Tong TY, Forouhi NG, Khandelwal S, Prabhakaran D, Mozaffarian D, de Lorgeril M. Definitions and potential health benefits of the Mediterranean diet: views from experts around the world. *BMC Medicine* 2014;12:112.
6. Nordic Nutrition Recommendations. 2012. Integrating nutrition and physical activity. [Internet]. Copenhagen, Denmark: Nordic Council of Minister; 2014 [cited 2021 Sep 1]. 627 p. Available from: doi.org/10.6027/Nord2014-002
7. Otten JJ, Hellwig JP, Meyers LD, editors. Dietary Reference Intakes: The essential guide to nutrient requirements [Internet]. Washington, D.C: The National Academies Press; 2006 [cited 2022 Jan 28]. 543 p. Available from: <https://doi.org/10.17226/11537>
8. 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.
9. Sobiecki JG, Appleby PN, Bradbury KE, Key TJ. 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* 2016;36:464–77.
10. 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. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2015;101:1346S-1352S.
11. 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). *The Journal of Nutrition* 2020;150:536–45.
12. Tso R, Forde CG. Unintended Consequences: Nutritional Impact and Potential Pitfalls of Switching from Animal- to Plant-Based Foods. *Nutrients* 2021;13:2527.
13. Brunin J, Pointereau P, Allès B, Touvier M, Hercberg S, Lairon D, Baudry J, Kesse-Guyot E. Are recent dietary changes observed in the NutriNet-Santé participants healthier and more sustainable? *Eur J Nutr* 2022;61:141–55.
14. Vieux F, Darmon N, Touazi D, Soler LG. Greenhouse gas emissions of self-selected individual diets in France: Changing the diet structure or consuming less? *Ecological Economics* 2012;75:91–101.
15. de Gavelle E, Davidenko O, Fouillet H, Delarue J, Darcel N, Huneau J-F, Mariotti F. 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* 2019;142:104345.
16. Clonan A, Wilson P, Swift JA, Leibovici DG, Holdsworth M. Red and processed meat consumption and purchasing behaviours and attitudes: impacts for human health, animal welfare and environmental sustainability. *Public Health Nutr* 2015;18:2446–56.
17. Hallström E, Carlsson-Kanyama A, Börjesson P. Environmental impact of dietary change: a systematic review. *Journal of Cleaner Production* 2015;91:1–11.
18. Scarborough P, Appleby PN, Mizdrak A, Briggs ADM, Travis RC, Bradbury KE, Key TJ. Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Climatic Change* 2014;125:179–92.
19. Meat consumption in France in 2020. [Internet]. FranceAgriMer; 2021 [cited 2022 Jan 28]. Available from: https://www.franceagrimer.fr/content/download/66996/document/NCO-VIA-Consommation_viandes_France_2020.pdf
20. Inguglia ES, Zhang Z, Tiwari BK, Kerry JP, Burgess CM. Salt reduction strategies in processed meat products – A review. *Trends in Food Science & Technology* 2017;59:70–8.

21. Geiker NRW, Bertram HC, Mejbörn H, Dragsted LO, Kristensen L, Carrascal JR, Bügel S, Astrup A. Meat and Human Health—Current Knowledge and Research Gaps. *Foods* 2021;10:1556.
22. Recommendations concerning diet, physical activity and sedentary behavior for adults [Internet]. Educational file. Paris, France: French Public Health Agency; 2019 [cited 2022 Jan 28]. 62 p. Available from: www.santepubliquefrance.fr
23. Wyness L, Weichselbaum E, O'Connor A, Williams EB, Benelam B, Riley H, Stanner S. Red meat in the diet: an update. *Nutrition Bulletin* 2011;36:34–77.
24. Vitamin and mineral requirements in human nutrition [Internet]. 2nd ed. Geneva : Rome: World Health Organization ; Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2005 [cited 2022 Jan 28]. 341 p. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42716>
25. Dietary Reference Values for nutrients Summary report [Internet]. The European Food Safety Authority (EFSA); 2017 [cited 2021 Jun 22]. 98 p. Available from: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/sp.efsa.2017.e15121>
26. The nutritional guideline update for vitamins and minerals [Internet]. Paris, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses); 2021 Mar p. 241. Available from: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2018SA0238Ra.pdf> [cited 2021 Jun 22]
27. 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. *British Journal of Nutrition* 2021;126:1225–36.
28. Schlemmer U, Frølich W, Prieto RM, Grases F. Phytate in foods and significance for humans: Food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis. *Molecular Nutrition & Food Research* 2009;53:S330–75.
29. Hurrell R, Egli I. Iron bioavailability and dietary reference values. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2010;91:1461S-1467S.
30. Hallberg L, Hultén L, Gramatkovski E. Iron absorption from the whole diet in men: how effective is the regulation of iron absorption? *The American Journal of Clinical Nutrition* 1997;66:347–56.
31. 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. *Advances in Nutrition* 2021;12:590–9.
32. 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—a diet optimization study in French adults. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2021;
33. Conrad Z, Karlsen M, Chui K, Jahns L. Diet quality on meatless days: National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES), 2007–2012. *Public Health Nutr* 2017;20:1564–73.
34. Hemler EC, Hu FB. Plant-Based Diets for Cardiovascular Disease Prevention: All Plant Foods Are Not Created Equal. *Curr Atheroscler Rep* 2019;21:18.
35. 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. *Journal of the American College of Cardiology* 2017;70:411–22.
36. Sawicki CM, Jacques PF, Lichtenstein AH, Rogers GT, Ma J, Saltzman E, McKeown NM. Whole- and Refined-Grain Consumption and Longitudinal Changes in Cardiometabolic Risk Factors in the Framingham Offspring Cohort. *The Journal of Nutrition* 2021;151:2790–9.

37. Gehring J, Touvier M, Baudry J, Julia C, Buscail C, Srouf 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. *The Journal of Nutrition* 2021;151:120–31.
38. The Third Individual and National Survey on Food Consumption (INCA3 Survey) [Internet]. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Maisons-Alfort, France; 2017 [cited 2021 Jun 22]. 24 p. Available from: <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf> [cited 2021 Jun 22]
39. 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.
40. CIQUAL. The ANSES-CIQUAL food composition table [Internet]. 2017 [cited 2021 Jun 22]. Available from: <https://ciqual.anses.fr/#>
41. De Gavelle E, Huneau J-F, Bianchi CM, Verger EO, Mariotti F. Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults. *Nutrients* 2017;9:1333.
42. Study of the relationship between food group consumption and risk of chronic non-communicable diseases [Internet]. Paris, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses); 2016 Nov p. 186. Available from: <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf> [cited 2021 Jun 22]
43. Updating of the PNNS guidelines: Revision of the food-based dietary guidelines [Internet]. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses). Maisons-Alfort, France; 2016 [cited 2021 Jun 22]. 190 p. Available from: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf> [cited 2021 Jun 22]
44. Kramer GFH, Martinez EV, Espinoza-Orias ND, Cooper KA, Tyszler M, Blonk H. Comparing the Performance of Bread and Breakfast Cereals, Dairy, and Meat in Nutritionally Balanced and Sustainable Diets. *Frontiers in Nutrition* 2018;5:9.
45. Gunantara N. A review of multi-objective optimization: Methods and its applications. *Ai Q*, editor. *Cogent Engineering Cogent OA*; 2018;5:1502242.
46. The Second French Individual and National Survey on Food Consumption (INCA2 Survey). French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses) 2009;227.
47. 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.
48. Opinion of the French Food Safety Agency on the benefits/risks of fish consumption [Internet]. Paris, France: French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses); 2008 Jun p. 31. Available from: <https://www.anses.fr/fr/system/files/RCCP2008sa0123.pdf> [cited 2021 Aug 19]
49. Mausser H, Grodzevich O, Romanko O, Ding Y, Gregov S, Halevy I, Kavazovic Z, Seeman T, Shioda R, Youbiss F. Normalization and Other Topics in MultiObjective Optimization. *Fields-MITACS Industrial Problem Solving Workshop and the Algorithmics 2006*;pp.59-101.
50. Wilson N, Cleghorn CL, Cobiack LJ, Mizdrak A, Nghiem N. Achieving Healthy and Sustainable Diets: A Review of the Results of Recent Mathematical Optimization Studies. *Advances in Nutrition* 2019;10:S389–403.
51. Papp R-E, Hasenegger V, Ekmekcioglu C, Schwingshackl L. Association of poultry consumption with cardiovascular diseases and all-cause mortality: a systematic review and dose response meta-analysis of prospective cohort studies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2021;0:1–22.

52. Papier K, Knuppel A, Syam N, Jebb SA, Key TJ. Meat consumption and risk of ischemic heart disease: A systematic review and meta-analysis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 2021;0:1–12.
53. 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). *The Journal of Nutrition* 2021;151:2435–45.
54. Seves SM, Verkaik-Kloosterman J, Biesbroek S, Temme EH. Are more environmentally sustainable diets with less meat and dairy nutritionally adequate? *Public Health Nutrition* 2017;20:2050–62.
55. Iron and Health [Internet]. London, United Kingdom: Scientific Advisory Committee on Nutrition; 2010 [cited 2021 Aug 26]. 361 p. Available from: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/339309/SACN_Iron_and_Health_Report.pdf
56. Environment, Biomonitoring, Physical Activity and Nutrition Health Study (Esteban 2014-2016). Nutrition Component. Chapter Bioassays: vitamins and minerals [Internet]. Saint-Maurice, France: French Public Health Agency; 2019 [cited 2021 Jun 22]. 61 p. Available from: <https://www.santepubliquefrance.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/documents/rapport-synthese/etude-de-sante-sur-l-environnement-la-biosurveillance-l-activite-physique-et-la-nutrition-esteban-2014-2016--volet-nutrition.-chapitre-dosages>
57. Hallberg L, Brune M, Rossander L. Iron absorption in man: ascorbic acid and dose-dependent inhibition by phytate. *The American Journal of Clinical Nutrition* 1989;49:140–4.
58. 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. *Journal of Cleaner Production* 2017;165:930–50.
59. Moretti D. Plant-Based Diets and Iron Status. *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*. Academic Press. 2017. p. 715–27.
60. Hunt JR. Moving toward a Plant-based Diet: Are Iron and Zinc at Risk? *Nutrition Reviews* 2002;60:127–34.
61. Saunders AV, Craig WJ, Baines SK, Posen JS. Iron and vegetarian diets. *The Medical Journal of Australia* 2013;199:S11-16.
62. 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. *The Journal of Nutrition* 2013;143:1466–73.
63. Mariotti F, Gardner CD. Dietary Protein and Amino Acids in Vegetarian Diets—A Review. *Nutrients* 2019;11:2661.
64. Gardner CD, Hartle JC, Garrett RD, Offringa LC, Wasserman AS. Maximizing the intersection of human health and the health of the environment with regard to the amount and type of protein produced and consumed in the United States. *Nutrition Reviews* 2019;77:197–215.
65. 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* 2018;2:e451–61.

TABLE 1. Daily intakes of limiting nutrients in observed and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

		Males											Lower bound	Upper bound	
Nutrient ³	Unit	Observed diet	Modeled diet ²												
			10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%			
Vitamin A	µg·d ⁻¹	805	750 ⁴	750	750	769	764	753	750	750	750	750	750	750	-
Vitamin C	mg·d ⁻¹	98 ⁵	110	127	146	162	170	170	170	170	170	170	170	110	-
Bioavailable iron	mg·d ⁻¹	1.68	1.20	1.21	1.20	1.20	1.31	1.31	1.31	1.29	1.26	1.23	1.103	-	
Iodine	µg·d ⁻¹	175	150	150	150	150	153	157	159	161	165	150	600		
Potassium	mg·d ⁻¹	3736	3984	4061	4221	4356	4143	4131	4120	4104	4079	4059	3500	-	
Sodium	mg·d ⁻¹	3938	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	1500	2300	
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	14%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	11%	11%	-	12%	
Lauric+myristic+palmitic acids	%EI·d ⁻¹	8%	8%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	-	8%	
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	-	
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	-	
EPA+DHA ⁶	g·d ⁻¹	0.33	0.51	0.50	0.50	0.50	0.65	0.50	0.50	0.50	0.51	0.65	0.50	-	
Sugars (excluding lactose)	g·d ⁻¹	102	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100	
Fiber	g·d ⁻¹	23	30	32	34	36	37	38	39	40	40	40	30	-	

		Females											Lower bounds	Upper bounds
Nutrient ³	Unit	Observed diet	Modeled diet ²											
			10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Vitamin A	µg·d ⁻¹	608	650 ⁴	711	650	703	698	694	689	685	681	674	650	-
Vitamin C	mg·d ⁻¹	84 ⁵	110	110	125	149	147	146	145	144	143	143	110	-
Bioavailable iron	mg·d ⁻¹	1.21	1.16	1.16	1.17	1.22	1.22	1.22	1.21	1.20	1.19	1.17	1.16	-
Iodine	µg·d ⁻¹	145	150	150	150	150	153	158	160	160	160	160	150	600
Potassium	mg·d ⁻¹	2906	3799	3809	3500	3786	3772	3760	3752	3738	3718	3703	3500	-
Sodium	mg·d ⁻¹	3100	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	1500	2300
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	15%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	-	12%
Lauric+myristic+palmitic acids	%EI·d ⁻¹	9%	8%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	-	8%
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	-
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	-

EPA+DHA ⁶	g·d ⁻¹	0.22	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
Sugars (excluding lactose)	g·d ⁻¹	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100
Fiber	g·d ⁻¹	19	30	32	32	35	35	36	37	38	38	39	30	-	

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled scenario, total meat consumption was reduced by at least x% of its observed value.

³ Only limiting nutrients (*i.e.*, nutrients whose constraint was active in at least one step of the transition in males or females, thus constraining the identified dietary solution) are represented here. See Supplemental Table 3 for the other nutrients considered in the model.

⁴ In the modeled diets, the nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are in white on a black background. In addition, for bioavailable iron, for which the lower bound was set at the security threshold, intakes lower than reference value are on a grey background.

⁵ In the observed diet, the nutrient intakes not complying with nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are in bold. For bioavailable iron, for which the lower bound was set at the security threshold, bold indicate a value lower than the reference value.

⁶ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid

Legends for Figures

FIGURE 1. Average daily consumption of food groups in observed (Obs) and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value. For clarity, the 45 modeled food groups are not shown here but were grouped into broader categories that were included in the *Healthy Dietary Pattern* criterion (such as red meat, processed meat, soft drinks, grain products, fruits and vegetables) or represented other protein sources (such as poultry, seafood, dairy products, eggs, legumes and nuts). The remaining food groups were grouped as "others" (8 groups) and "other drinks" (3 groups) and are not presented in Figure 1. Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2.

FIGURE 2. Daily consumption of meat by type (processed meat, pork and other meats, offal, beef and veal, poultry) in observed (Obs) and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

In each x% modeled scenario, total meat consumption was reduced by at least x% of its observed value. The black line shows the minimal reduction set at each step. "Other meats" includes lamb, game, rabbit, and horse meat.

FIGURE 3. Values of the *Healthy Dietary Pattern* (HDP) and *Diet Departure* (DD) criteria of the objective function throughout the optimization steps of the meat reduction transition from the initial observed diets in males and females

In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value.

a.u., arbitrary unit.

FIGURE 4. Contribution of food groups to bioavailable iron and zinc, vitamins A and B12 and protein in observed (Obs) and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value. For clarity, the 45 modeled food groups are not shown here but were grouped into broader categories were included in the Healthy Dietary Pattern criterion (such as red meat, processed meat, soft drinks, grain products, fruits and vegetables) or represented other protein sources (such as poultry, seafood, dairy products, eggs, legumes and nuts), and the remaining food groups were grouped as "others" (8 groups) and "other drinks" (3 groups). Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2. As iron and zinc intakes took into account their bioavailability, protein intake took into account the poorer digestibility of vegetable proteins (see Methods for detailed information). For each nutrient, current reference values and security thresholds (for bioavailable iron and zinc) are represented by solid and dashed lines, respectively (see Methods for detailed information on how flexibility was allowed on bioavailable iron and zinc using goal variables, and Table 1 and Supplemental Table 3 for detailed values on current references and security thresholds).

Figures show nutrients that are largely contributed by meat in the observed diets.

FIGURE 1.

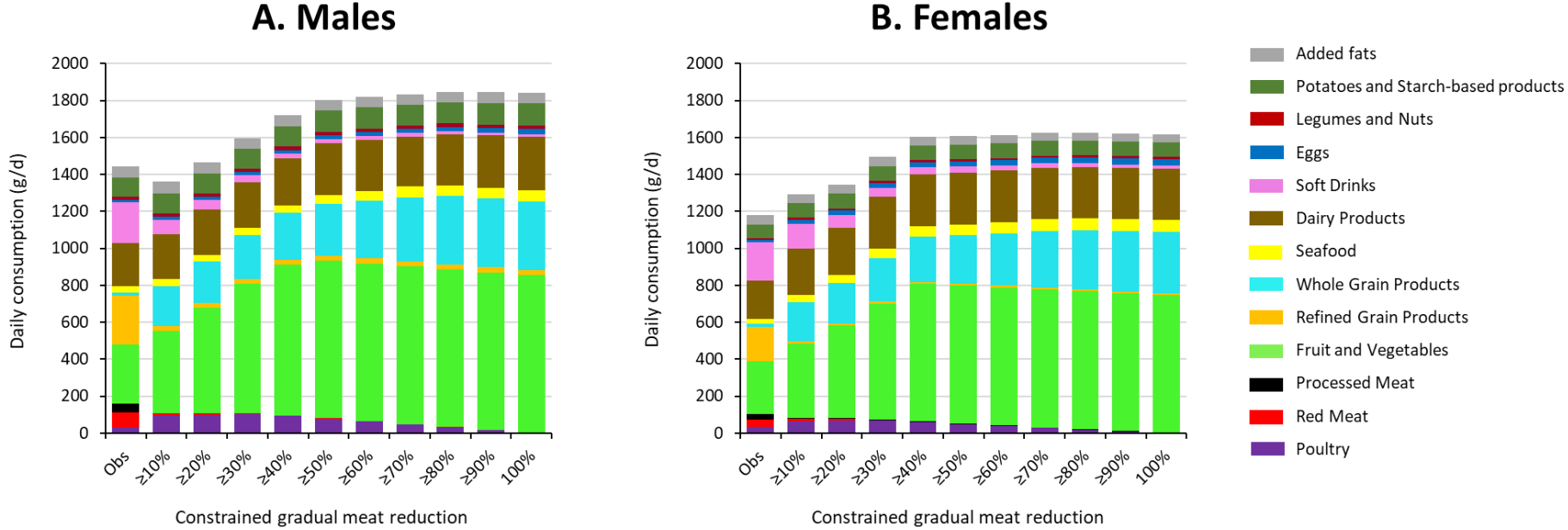


FIGURE 2.

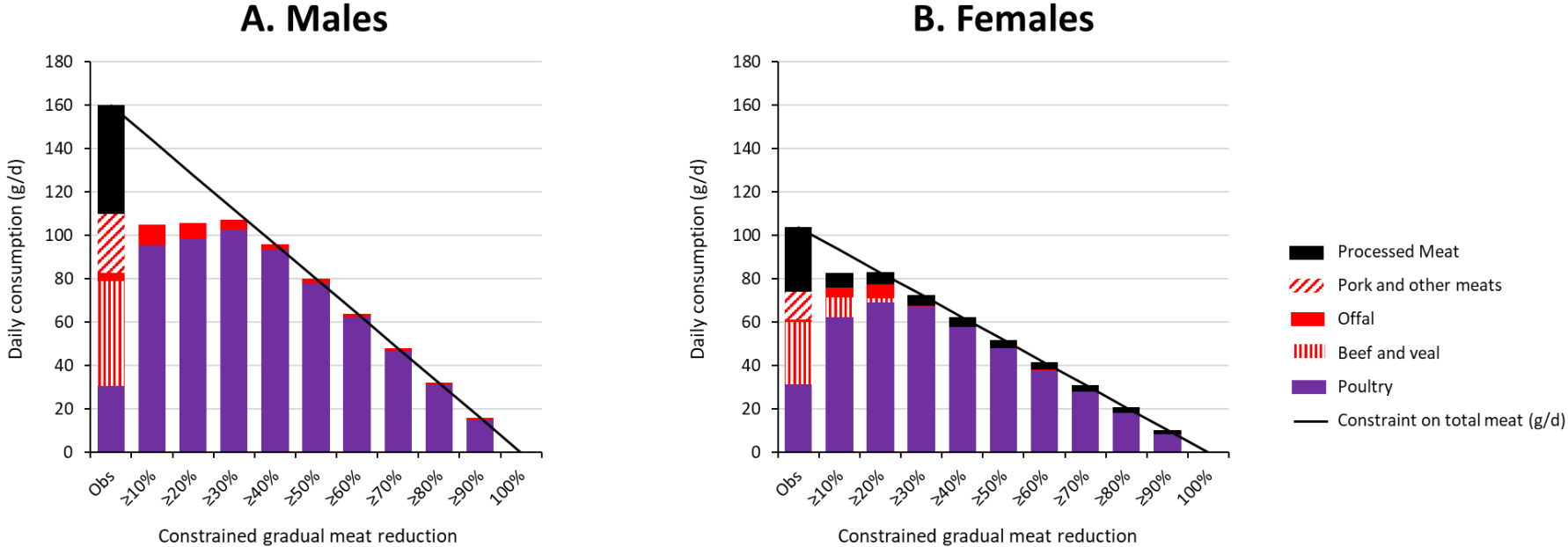


FIGURE 3.

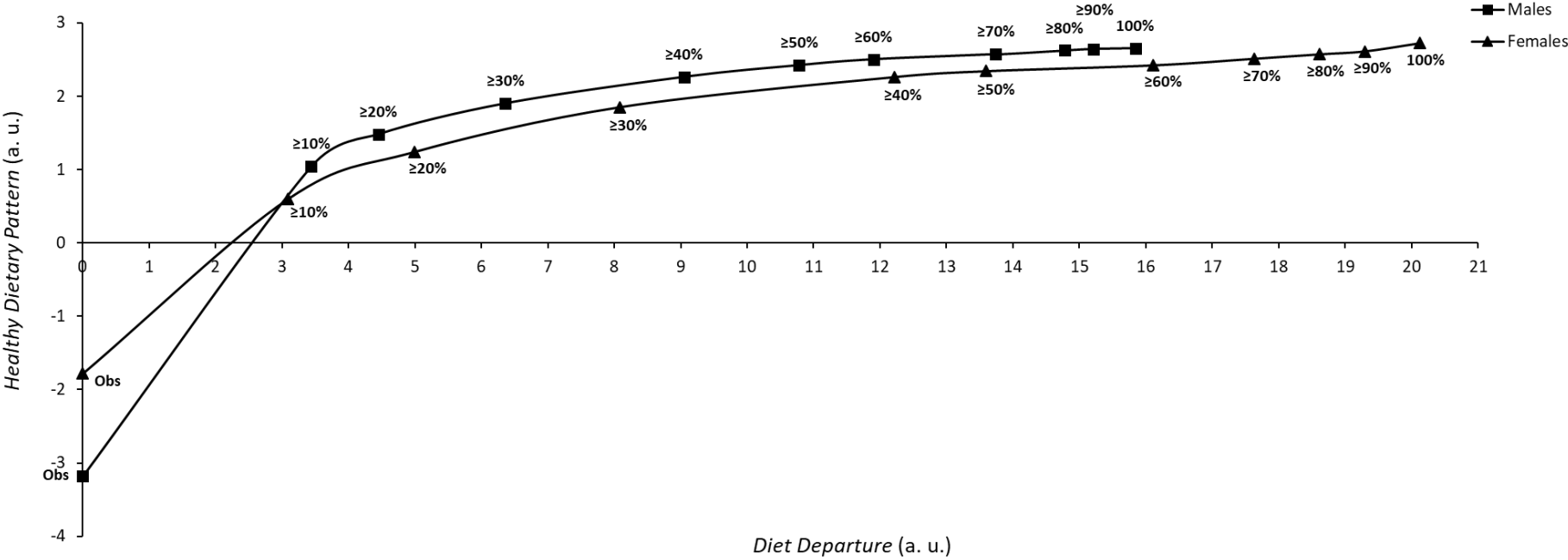
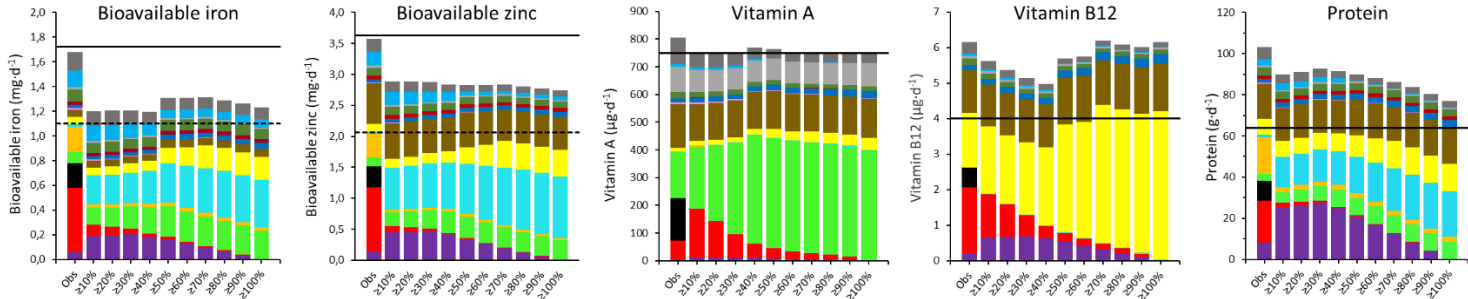
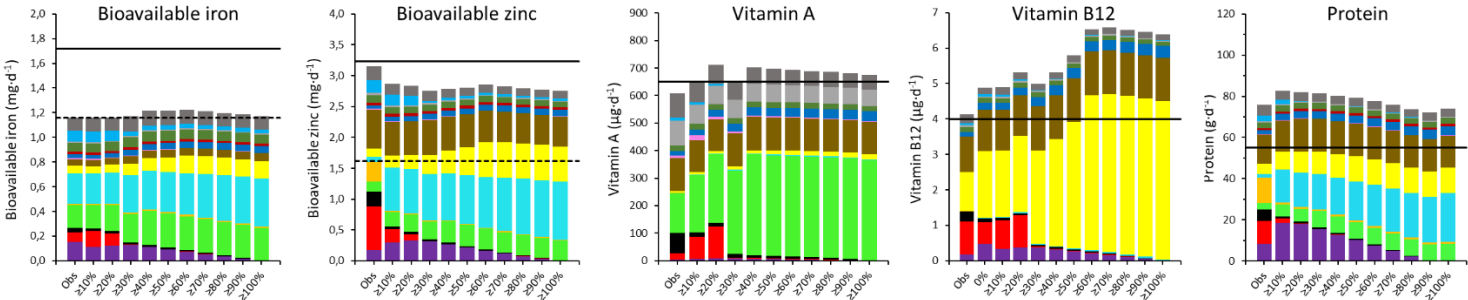


FIGURE 4.

A. Males



B. Females



- Others
- Other drinks
- Added fats
- Potatoes and Starch-based products
- Legumes and Nuts
- Eggs
- Soft Drinks
- Dairy Products
- Seafood
- Whole Grain Products
- Refined Grain Products
- Fruit and Vegetables
- Processed Meat
- Red Meat
- Poultry
- Current reference value
- Security threshold

Nutritional issues and dietary levers during gradual meat reduction - a sequential diet optimization study to achieve progressively healthier diets

Dussiot *et al.*

ONLINE SUPPLEMENTARY MATERIAL

SUPPLEMENTAL TABLE 1 Lifestyle and sociodemographic characteristics of the sample of adults ($n = 1\,125$) extracted from the French national INCA3 study, 2014-2015

	Males ($n = 564$)	Females ($n = 561$)
Age, %		
< 25y	9%	8%
25-35y	16%	25%
35-50y	38%	52%
50-65y	37%	15%
Level of education, %		
< High-school diploma	34%	23%
High-school diploma	21%	21%
Post-secondary education	44%	56%
Body Mass Index, %		
< 18.5 kg.m ⁻²	2%	4%
18.5-24.99 kg.m ⁻²	49%	59%
25-29.99 kg.m ⁻²	38%	24%
> 30 kg.m ⁻²	11%	12%
Alcohol consumption, %		
Non-drinker	30%	54%
Moderate drinker ¹	70%	46%
Heavy drinker ²	-	-

¹ <20g/d for females and <30 g/d for males

² >20g/d for females and >30 g/d for males (1)

SUPPLEMENTAL TABLE 2 Summary of foods groups formed for food categorization

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion of food group within the category	Main types of foods (Proportion of foods within the group)
Fruit and vegetables (244)	Vegetables (149)	61%	Raw vegetables (~ 40%) Cooked vegetables (~ 30%)
	Fresh fruits (50)	20%	Raw fruits (100%)
	Dried fruits (9)	4%	Dried fruits (70%) Chestnuts (30%)
	Processed fruits: compotes and cooked fruit (13)	5%	Compote (40%) Fruit in syrup (40%)
	Nuts, seeds and oleaginous fruits (23)	9%	Oleaginous fruits (~ 50%) Seeds (~ 40%)
Starches (171)	Bread and refined bakery products (36)	21%	Breads (~ 50%) Rusks (~ 20%)
	Whole meal and semi-refined bread and bakery products (15)	9%	Breads (~ 50%) Rusks (~ 30%)
	Other refined starches (13)	8%	Rice (~ 30%) Pasta (~ 20%)
	Other complete and semi- complete starches (11)	6%	Wheat (50%) Quinoa (20%)
	Starch-based products, sweet/fat processed (61)	36%	Breakfast cereals (~ 50%) Cookies (~ 20%)
	Salt/fat processed starch products (15)	9%	Savory cookies (~ 50%) Chips: 4 foods (~ 20%)
	Potatoes and other tubers (20)	12%	Potatoes (~ 50%) Other tubers (~ 20%)
Legumes (16)	Legumes (16)	100%	Dried beans (~ 50%) Lentils (15%)

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion within the category	Main types of foods (Proportion of food within the group)
Meats, Processed meats, Fish products, Eggs (315)	Poultry (24)	8%	Chicken (~ 30%) Duck (~ 20%)
	Beef and veal (40)	13%	Beef (~ 65%) Veal (~ 35%)
	Pork and other meats (39)	12%	Pork (~ 40%) Lamb (~ 30%)
	Offal (19)	6%	Beef and veal (~ 50%)
	Processed meats (71)	23%	Sausages, "andouilles" (~ 35%) "Rillettes", "pâtés", "terrines", "foie gras" (~ 35%)
	Oily fish (32)	10%	Salmon (~ 30%) Mackerel (~ 20%)
	Other fish (55)	17%	Tuna (~ 15%) Trout (~ 10%)
	Mollusks and crustaceans (21)	7%	Mollusks excluding cephalopods (40%) Crustaceans (~ 30%)
	Eggs and egg-based dishes (14)	4%	Whole eggs (~ 65%) Egg yolks (~ 20%)
Milk and dairy products (192)	Milk (15)	8%	Semi-skimmed cow's milk (40%) Whole cow's milk (25%)
	Fresh natural dairy products (18)	9%	Yoghurts, fermented milks and dairy specialties (~ 55%) Cottage cheeses, "Faisselles", "Petit Suisse" (~ 45%)
	Fresh sweetened dairy products (39)	20%	Yoghurts, fermented milks and dairy specialties (~ 65%) Cottage cheeses, "Faisselles", "Petit Suisse" (~ 25%)
	Sweet milky desserts (22)	11%	Cream desserts (~ 60%) Other sweet desserts (~ 25%)
	Cheese (98)	51%	-

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion within the category	Main types of foods (Proportion of food within the group)
Added fats and oils (98)	Animal fats and assimilated fats (4)	4%	Lard, bacon, duck or goose fat
	Butter and low-fat butter (11)	11%	Butter (55%) Low-fat butter (45%)
	Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid (4)	4%	Vegetable oils (100%): rapeseed, flax, walnut, soybean
	Vegetable fats low in alpha-linoleic acid (24)	24%	Vegetable oils (peanut, sunflower, palm, frying) (33%) Vegetable fats (margarine type) (67%)
	Sauces and fresh creams (55)	56%	Hot sauces (80%) Cold sauces (ketchup, mustard, mayo, miso) (20%)
Sweet products or Sweet and fatty products (198)	Sweet products or sweet and fatty products (198)	100%	Pastries (~ 15%) Cookies (~ 10%)
Drinking water (44)	Drinking water (44)	100%	-
Alcohol-free soft drinks (74)	Sweetened soda-type drinks (45)	61%	-
	Fruit juices (29)	39%	-
Hot drinks (22)	Hot drinks (22)	100%	Coffee and related products (~ 60%) Tea and herbal teas (~ 30%)
Salt (6)	Salt (6)	100%	-
Condiments (13)	Condiments (13)	100%	Olives or similar (~ 50%) Vinegar products (~ 20%)
Aromatic herbs, Spices except salt (38)	Aromatic herbs, spices except salt (38)	100%	Aromatic herbs (~ 65%) Spices (35%)

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion within the category	Main types of foods (Proportion of food within the group)
Soups and Bouillons (38)	Soups (30)	79%	Vegetable soups (with or without cheese) (85%) Soups with eggs, poultry or fish (15%)
	Bouillons (8)	21%	Broths with meat (75%) Vegetable broths only (25%)
Substitutes of animal products (9)	Substitutes for animal products (9)	100%	Soy products (~ 90%) Almond drink (~ 10%)
Other foods (14)	Other foods (14)	100%	Fish eggs (~ 40%) Vinegars (25%)
Alcoholic drinks (41)	Alcoholic drinks (41)	100%	-

SUPPLEMENTAL TABLE 3. Daily intakes of nutrients in observed and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

Nutrient	Unit	Males											Lower bounds	Upper bounds
		Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ¹											
			10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Retinol	$\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	573	496	450	396	354	345	334	331	331	330	330	-	3000
Vitamin A	$\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	805	750 ²	750	750	769	764	753	750	750	750	750	750	-
Thiamin	$\mu\text{g}\cdot(\text{kcal}\cdot\text{d})^{-1}$	0.54	0.51	0.52	0.54	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.54	0.54	0.42	-
Riboflavin	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	2.17	2.11	2.10	2.09	2.05	1.92	1.94	1.97	1.96	1.95	1.96	1.60	-
Niacin ³	$\mu\text{g NE}\cdot(\text{kcal}\cdot\text{d})^{-1}$	20	20	20	20	20	10	10	10	10	10	10	6.7	-
Pantothenic acid	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	6.90	6.94	7.01	7.10	7.08	6.85	6.68	6.56	6.46	6.33	6.26	3.77	-
Vitamin B6	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	2.06	2.04	2.12	2.23	2.28	2.32	2.24	2.18	2.13	2.07	2.03	1.70	25
Folate	$\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	347	381	400	424	453	462	470	477	484	485	486	330	-
Vitamin B12	$\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	6.15	5.62	5.37	5.14	4.97	5.69	5.75	6.19	6.09	6.02	6.15	4.00	-
Vitamin C	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	98 ⁴	110	127	146	162	170	170	170	170	170	170	110	-
Vitamin D ⁵	$\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	3.49	3.50	3.48	3.45	3.41	3.80	3.35	3.24	3.23	3.31	3.69	-	100
Vitamin E	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	13	15	15	16	17	17	17	17	17	18	18	5.28	-
Vitamin K1	$\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	118	150	169	191	216	218	219	219	220	220	220	39	-
Calcium	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	1 065	1 028	1 035	1 042	1 051	1 049	1 056	1 059	1 070	1 081	1 096	950	2500
Copper	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	2.08	2.19	2.17	2.18	2.20	2.16	2.25	2.36	2.40	2.40	2.38	1.99	5
Bioavailable Iron	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	1.68	1.20	1.21	1.20	1.20	1.31	1.31	1.31	1.29	1.26	1.23	1.103	-
Iodine	$\mu\text{g}\cdot\text{d}^{-1}$	175	150	150	150	150	150	153	157	159	161	165	150	600
Magnesium	$\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$	409	465	470	480	485	446	459	472	479	478	476	254	-

¹ In each x% modeled scenario, total meat consumption was reduced by at least x% of its observed value.

² In the modeled diets, the nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are in white on a black background. In addition, for bioavailable iron and bioavailable zinc, for which the lower bounds were set at the security thresholds, intakes lower than reference value are on a grey background.

³ 1 mg niacin equivalent (NE) is equal to 1mg niacin or 60 mg tryptophan.

⁴ In the observed diet, nutrient intakes not complying with the nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are in bold. For bioavailable iron and bioavailable zinc, for which the lower bounds were set at the security thresholds, bold indicate a value lower than the reference value.

⁵ One exception was vitamin D, for which we did not set any lower constraint; based on previous works, the reference value is known to be much too high to permit a solution from diet optimization (2,3).

		Males											Lower bounds	Upper bounds
Nutrient	Unit	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%)											
			10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Manganese	mg·d ⁻¹	3.61	4.44	4.61	4.80	5.00	4.99	5.24	5.50	5.69	5.73	5.74	1.99	-
Phosphorus	mg·d ⁻¹	1 483	1 462	1 488	1 519	1 536	1 565	1 562	1 560	1 556	1 535	1 516	550	-
Potassium	mg·d ⁻¹	3 736	3 984	4 061	4 221	4 356	4 143	4 131	4 120	4 104	4 079	4 059	3500	-
Selenium	µg·d ⁻¹	146	127	130	132	133	126	130	132	131	130	125	70	300
Sodium	mg·d ⁻¹	3 938	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	1500	2300
Bioavailable zinc	mg·d ⁻¹	3.57	2.89	2.88	2.87	2.84	2.83	2.83	2.84	2.80	2.77	2.74	2.063	25
Water	g·d ⁻¹	2 780	2 643	2 686	2 735	2 754	2 503	2 510	2 516	2 522	2 520	2 516	2500	-
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	14%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	10%	10%	11%	11%	-	12%
Lauric+myristic+palmitic acids	%EI·d ⁻¹	8%	8%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	-	8%
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	-
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	-
Linoleic acid / α-linolenic acid ratio	-	7.90	4.09	4.06	4.02	3.96	3.89	3.91	3.90	3.87	4.00	4.00	-	5
EPA+DHA ¹	g·d ⁻¹	0.33	0.51	0.50	0.50	0.50	0.65	0.50	0.50	0.50	0.51	0.65	0.50	-
Sugar excluding lactose	g·d ⁻¹	102	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100
Protein ²	g·d ⁻¹	103	90	91	93	91	90	88	86	84	80	77	64	179
Fiber	g·d ⁻¹	23	30	32	34	36	37	38	39	40	40	40	30	-

¹ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

² Intakes (mg/d) were converted to mg/kg body weight/day for a mean body weight of 77.4 kg for males. To account for the slightly lower average digestibility of plant protein, protein intake from plants was reduced by 5% when calculating total protein intake, as previously described in the Methods section (L122-L123).

SUPPLEMENTAL TABLE 3 cont. Daily intakes of limiting nutrients in observed and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

		Females											Lower bounds	Upper bounds
Nutrient	Unit	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ¹											
			10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Retinol	µg·d ⁻¹	395	378	409	302	295	293	290	288	285	282	275	-	3000
Vitamin A	µg·d ⁻¹	608	650 ²	711	650	703	698	694	689	685	681	674	650	-
Thiamin	µg·(kcal·d) ⁻¹	0.56	0.56	0.56	0.55	0.57	0.57	0.56	0.56	0.55	0.55	0.54	0.42	-
Riboflavin	mg·d ⁻¹	1.66	1.90	1.89	1.67	1.73	1.72	1.72	1.72	1.71	1.70	1.69	1.60	-
Niacin ³	µg NE·(kcal·d) ⁻¹	20	20	20	10	10	10	10	10	10	10	10	6.7	-
Pantothenic acid	mg·d ⁻¹	5.29	6.29	6.35	6.05	6.26	6.18	6.11	6.05	5.97	5.88	5.81	3.20	-
Vitamin B6	mg·d ⁻¹	1.51 ⁴	1.84	1.87	1.90	1.98	1.93	1.89	1.86	1.82	1.77	1.74	1.60	25
Folate	µg·d ⁻¹	280	359	370	377	419	421	425	430	432	432	433	330	-
Vitamin B12	µg·d ⁻¹	4.14	4.90	5.32	5.00	5.31	5.79	6.54	6.57	6.51	6.45	6.39	4.00	-
Vitamin C	mg·d ⁻¹	84	110	110	125	149	147	146	145	144	143	143	110	-
Vitamin D ⁵	µg·d ⁻¹	2.87	3.54	3.58	3.66	3.64	3.59	3.51	3.48	3.47	3.47	3.47	-	100
Vitamin E	mg·d ⁻¹	11	13	14	14	15	15	15	15	15	15	15	4.37	-
Vitamin K1	µg·d ⁻¹	111	150	169	216	218	218	218	218	218	219	219	35	-
Calcium	mg·d ⁻¹	892	983	988	974	1 006	1 010	1 015	1 018	1 019	1 020	1 021	950	2500
Copper	mg·d ⁻¹	1.56	1.99	2.10	1.82	1.96	2.03	2.13	2.18	2.21	2.22	2.23	0.89	5
Bioavailable Iron	mg·d ⁻¹	1.21	1.16	1.16	1.17	1.22	1.22	1.22	1.21	1.20	1.19	1.17	1.16	-
Iodine	µg·d ⁻¹	145	150	150	150	150	153	158	160	160	160	160	150	600
Magnesium	mg·d ⁻¹	330	436	434	384	410	418	427	437	441	442	443	195	-

¹ In each x% modeled scenario, the total meat consumption was reduced by at least x% of its observed value.

² In the modeled diets, nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are in white on a black background. In addition, for bioavailable iron and bioavailable zinc, for which the lower bounds were set at the security thresholds, intakes lower than reference value are on a grey background.

³ 1 mg niacin equivalent (NE) is equal to 1mg niacin or 60 mg tryptophan.

⁴ In the observed diet, nutrient intakes not complying with the nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are in bold. For bioavailable iron and bioavailable zinc, for which the lower bounds were set at the security thresholds, bold indicate a value lower than the reference value.

⁵ One exception was vitamin D, for which we did not set any lower constraint; based on previous works, the reference value is known to be much too high to permit a solution from diet optimization (2,3).

		Females											Lower bounds	Upper bounds
Nutrient	Unit	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%)										Lower bounds	Upper bounds
			10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Manganese	mg·d ⁻¹	3.06	4.34	4.40	4.14	4.47	4.61	4.77	4.97	5.10	5.16	5.24	1.50	-
Phosphorus	mg·d ⁻¹	1 128	1 340	1 375	1 408	1 438	1 436	1 436	1 440	1 433	1 418	1 407	550	-
Potassium	mg·d ⁻¹	2 906	3 799	3 809	3 500	3 786	3 772	3 760	3 752	3 738	3 718	3 703	3500	-
Selenium	µg·d ⁻¹	120	119	122	130	123	124	125	125	123	122	120	70	300
Sodium	mg·d ⁻¹	3 100	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	2 300	1500	2300
Bioavailable zinc	mg·d ⁻¹	3.15	2.86	2.83	2.75	2.79	2.81	2.85	2.83	2.80	2.77	2.75	1.614	25
Water	g·d ⁻¹	2 422	2 454	2 395	2 120	2 215	2 209	2 206	2 208	2 203	2 194	2 187	2000	-
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	15%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	-	12%
Lauric+myristic+palmitic acids	%EI·d ⁻¹	9%	8%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	-	8%
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	-
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	-
Linoleic acid / α-linolenic acid ratio	-	7.24	4.12	4.13	4.15	4.08	4.06	4.05	4.04	4.02	4.00	3.97	-	5
EPA+DHA ¹	g·d ⁻¹	0.22	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
Sugar excluding lactose	g·d ⁻¹	80	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100
Protein ²	g·d ⁻¹	76	81	83	82	82	80	79	78	76	74	72	55	152
Fiber	g·d ⁻¹	19	30	32	32	35	35	36	37	38	38	39	30	-

¹ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

² Intakes (mg/d) were converted to mg/kg body weight/day for a mean body weight of 66.0 kg for females. To account for the slightly lower average digestibility of plant protein, protein intake from plants was reduced by 5% when calculating total protein intake, as previously described in the Methods section (L122-L123).

SUPPLEMENTAL TABLE 4. Summary of constraints and criteria for each food group in the diet optimization model for males and females

Food group	Optimization Objective (HDP criterion)	Males				Females			
		Observed consumption (g/d)	Constraint			Observed consumption (g/d)	Constraint		
			Lower limit ¹ (g/d)	Upper limit (g/d)	Joint upper limit (g/d)		Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Joint upper limit (g/d)
Vegetables	Maximization	176	20	400	-	160	18	387	-
Fresh fruits	Maximization	128	0	-	454 ²	107	0	-	359
Dried fruits		1	0	-		1	0	-	
Processed fruits: compotes and cooked fruit		13	0	-		15	0	-	
Nuts, seeds and oleaginous fruit		3	0	20	-	2	0	14	-
Bread and refined bakery products		168	27	-	-	115	10	-	-
Complete and semi-complete bread and bakery products	Maximization	11	0	-	-	15	0	-	-
Other refined starches		98	0	-	-	72	0	-	-
Other complete and semi-complete starches	Maximization	4	0	-	-	4	0	-	-
Starch-based products, sweet/fat processed		22	0	97	-	19	0	82	-
Salt/fat processed starch products		4	0	21	-	2	0	14	-
Potatoes and other tubers		79	0	264	-	49	0	196	-
Legumes		13	0	86	-	6	0	43	-
Poultry		30	0	108	-	31	0	109	-
Beef and veal	Minimization	48	0	-	71	28	0	-	71
Pork and other meats		27	0	-		13	0	-	
Offal		4	0	-		1	0	-	
Processed meat	Minimization	50	0	25	-	30	0	25	-
Oily fish ³		8	0	26	-	6	0	26	-
Other fish ³		22	0	110	-	15	0	80	-

¹ Lower and upper limits correspond to the 5th or 95th percentiles of consumption for all food groups except those with an upper limit set as a dietary constraint (red meat, processed meat and soft drinks).

² The most substitutable food groups were grouped together to define their lower and upper bounds as the 5th or 95th percentiles of their total consumption.

³ In order to consider the French dietary recommendations for fish consumption, two additional constraints were added to limit total fish consumption to 39 g/d and oily fish consumption to 26 g/d (4).

Food group	Optimization Objective (HDP criterion)	Males				Females			
		Observed consumption (g/d)	Constraint			Observed consumption (g/d)	Constraint		
			Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper Joint limit (g/d)		Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper joint limit (g/d)
Mollusks and crustaceans		5	0	28	-	4	0	26	-
Eggs and egg-based dishes		14	0	61	-	14	0	70	-
Milk		84	0	343	-	75	0	322	-
Fresh natural dairy products		31	0	138	-	33	0	143	-
Fresh sweetened dairy products		50	0	179	-	48	0	168	-
Sweet milky desserts		19	0	93	-	16	0	73	-
Cheeses		49	0	131	-	36	0	94	-
Animal fats and assimilated fats		1	0	0	-	0	0	0	-
Butter and light butter		10	0	33	-	10	0	30	-
Vegetable fats rich in α -linoleic acid		0	0	-	32	0	0	-	30
Vegetable fats rich in α -linoleic acid		12	0	-		10	0	-	
Sauces and fresh creams		35	0	118	-	32	0	100	-
Sweet products or sweet and fatty products		103	9	251	-	83	9	215	-
Drinking water		1007	182	-	-	929	75	-	-
Sweetened soda-type drinks	Minimization	141	0	-	263	140	0	-	263
Fruit juices		80	0	-		67	0	-	
Hot drinks		494	0	494		-	507	0	
Salt		1	0	4	-	1	0	4	-
Condiments		4	0	29	-	3	0	21	-
Aromatic herbs, Spices except salt		2	0	7	-	2	0	6	-
Soups		71	0	434	-	75	0	381	-
Bouillons		5	0	21	-	4	0	25	-

Food group	Optimization Objective (HDP criterion)	Males				Females			
		Observed consumption (g/d)	Constraint			Observed consumption (g/d)	Constraint		
			Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper joint limit (g/d)		Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Upper joint limit (g/d)
Substitutes for animal products		3	0	29	-	5	0	29	-
Other foods		4	4	4	-	2	2	2	-
Alcoholic drinks		216	0	216	-	59	0	59	-
Bread and bakery products		178	-	354	-	130	-	316	-
Other starches		102	-	276	-	76	-	188	-
Liquids		2098	1061	3777	-	1857	738	3087	-

SUPPLEMENTAL TABLE 5. Absolute and relative changes in daily food group consumptions under observed (Obs) and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females) ²

Diet composition, g/d	Males										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ³									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Fruits and vegetables	318	448	571	701	816	854	854	854	854	854	854
Refined grain products	266	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Whole grain products	14	217	225	236	255	281	312	346	369	372	373
Red meat	79	10	7	5	3	2	2	1	1	1	0
Processed meat	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Poultry	30	95	98	102	93	78	62	47	31	15	0
Seafood	36	35	35	37	39	47	53	59	59	59	59
Dairy products	233	245	248	250	253	280	277	272	276	282	291
Soft drinks	221	78	50	35	27	22	20	18	17	15	14
Eggs	14	17	17	18	19	21	22	23	24	25	28
Legumes and nuts	17	18	18	18	18	18	18	18	18	19	19
Potatoes and starch-based products	106	110	109	109	111	115	115	114	116	117	119
Added fats	58	61	59	58	58	57	57	56	56	56	57
Other drinks	1717	1689	1630	1560	1475	1150	1148	1144	1142	1141	1138
Others	192	108	107	95	81	73	72	72	72	73	73

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² Data are averages for each sex.

³ In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value. For clarity, the 45 modeled food groups are not shown here but were grouped into broader categories included in the *Healthy Dietary Pattern* criterion (such as red meat, processed meat, soft drinks, grain products, fruits and vegetables) or that represent other protein sources (such as poultry, seafood, dairy products, eggs, legumes and nuts). The remaining food groups were grouped as "others" (8 groups) and "other drinks" (3 groups). Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2.

		Males									
		Modeled diet with gradual meat reduction (%)									
Observed diet		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Differences from observed diets, % ⁴											
Δ Fruits and vegetables	-	41%	27%	23%	16%	5%	0%	0%	0%	0%	0%
Δ Refined grain products	-	-90%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Δ Whole grain products	-	1397%	4%	5%	8%	10%	11%	11%	7%	1%	0%
Δ Red meat	-	-88%	-25%	-36%	-41%	-28%	-24%	-18%	-14%	-31%	-98%
Δ Processed meat	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Δ Poultry	-	213%	3%	4%	-9%	-16%	-20%	-25%	-34%	-51%	-100%
Δ Seafood	-	-2%	2%	3%	6%	23%	12%	11%	0%	0%	0%
Δ Dairy products	-	5%	1%	1%	1%	11%	-1%	-2%	1%	2%	3%
Δ Soft drinks	-	-65%	-36%	-29%	-24%	-17%	-11%	-9%	-8%	-8%	-7%
Δ Eggs	-	18%	4%	4%	5%	14%	3%	3%	6%	7%	9%
Δ Legumes and nuts	-	11%	-1%	0%	1%	1%	0%	-1%	1%	2%	1%
Δ Potatoes and starch-based products	-	4%	-1%	0%	2%	3%	0%	-1%	1%	2%	1%
Δ Added fats	-	6%	-2%	-2%	0%	-1%	-1%	-2%	0%	1%	2%
Δ Other drinks	-	-2%	-3%	-4%	-5%	-22%	0%	0%	0%	0%	0%
Δ Others	-	-44%	0%	-11%	-15%	-10%	0%	-1%	1%	1%	0%

⁴ Percent increase or decrease at each step is relative to the observed diet.

SUPPLEMENTAL TABLE 5 cont. Absolute and relative changes in daily food group consumptions under observed (Obs) and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females) ²

	Females										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ³									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Diet composition, g/d											
Fruits and vegetables	283	402	498	629	746	746	746	746	746	746	746
Refined grain products	186	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Whole grain products	19	215	222	236	246	263	281	306	321	327	335
Red meat	42	14	8	0	0	0	0	0	0	0	0
Processed meat	30	7	6	5	4	4	3	3	3	2	0
Poultry	31	62	69	67	58	48	38	28	18	8	0
Seafood	25	38	43	50	53	57	63	63	63	63	63
Dairy products	208	252	256	282	284	283	281	279	279	278	278
Soft drinks	208	135	69	48	37	31	26	23	20	18	17
Eggs	14	20	23	26	28	29	30	31	32	34	35
Legumes and nuts	8	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Potatoes and starch-based products	71	78	80	81	81	81	80	80	80	80	80
Added fats	53	51	49	48	47	46	45	44	44	43	43
Other drinks	1495	1478	1388	966	964	963	961	960	959	958	957
Others	174	143	130	127	119	114	109	107	104	102	101

¹ Dietary inertia was modeled using the Diet Departure criterion.

² Data are averages for each sex.

³ In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value. For clarity, the 45 modeled food groups are not shown here but were grouped into broader categories included in the Healthy Dietary Pattern criterion (such as red meat, processed meat, soft drinks, grain products, fruits and vegetables) or that represent other protein sources (such as poultry, seafood, dairy products, eggs, legumes and nuts). The remaining food groups were grouped as "others" (8 groups) and "other drinks" (3 groups). Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2.

		Females									
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%)									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Differences from observed diets, % ⁴											
Δ Fruits and vegetables	-	42%	24%	26%	19%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Δ Refined grain products	-	-95%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Δ Whole grain products	-	1013%	4%	6%	4%	7%	7%	9%	5%	2%	2%
Δ Red meat	-	-68%	-40%	-97%	-7%	-8%	-10%	-12%	-18%	-32%	-100%
Δ Processed meat	-	-77%	-14%	-13%	-13%	-12%	-12%	-12%	-14%	-22%	-99%
Δ Poultry	-	98%	11%	-3%	-14%	-17%	-21%	-26%	-35%	-54%	-100%
Δ Seafood	-	52%	11%	18%	6%	7%	10%	1%	0%	0%	0%
Δ Dairy products	-	21%	2%	10%	1%	0%	-1%	0%	0%	0%	0%
Δ Soft drinks	-	-35%	-49%	-30%	-23%	-18%	-15%	-12%	-11%	-10%	-9%
Δ Eggs	-	49%	11%	17%	5%	4%	3%	4%	4%	4%	5%
Δ Legumes and nuts	-	25%	1%	1%	-1%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
Δ Potatoes and starch-based products	-	11%	2%	2%	-1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Δ Added fats	-	-3%	-4%	-2%	-3%	-2%	-2%	-1%	-1%	-1%	-1%
Δ Other drinks	-	-1%	-6%	-30%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Δ Others	-	-18%	-9%	-2%	-7%	-4%	-4%	-3%	-2%	-2%	-2%

⁴ Percent increase or decrease at each step is relative to the observed diet.

SUPPLEMENTAL TABLE 6. Relative changes to total and detailed daily meat consumption by type (processed meat, pork and other meats, offal, beef and veal, poultry) under modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

	Men										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Max. allowed meat consumption, g/d	-	144	128	112	96	80	64	48	32	16	0
Optimized meat consumption, g/d	160	105	106	107	96	80	64	48	32	16	0
Differences to observed diets, % ³											
Total meat consumption	-	-34%	-34%	-33%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%	-90%	-100%
Processed meat	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pork and other meats	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Offal	-	163%	96%	26%	-26%	-47%	-59%	-66%	-71%	-80%	-100%
Beef and veal	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Poultry	-	213%	223%	237%	206%	156%	105%	53%	2%	-50%	-100%

¹ Dietary inertia was modeled using the Diet Departure criterion.

² In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value. Total meat consumption at the bound (*i.e.*, corresponding to a limiting constraint) is in white on a black background.

³ Percent increase or decrease at each step is relative to the observed diet.

SUPPLEMENTAL TABLE 6 cont. Relative changes to total and detailed daily meat consumption by type (processed meat, pork and other meats, offal, beef and veal, poultry) under modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

	Women										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Max. allowed total meat consumption, g/d	-	93	83	73	62	52	42	31	21	10	0
Optimized total meat consumption, g/d	104	83	83	73	62	52	42	31	21	10	0
Differences to observed diets, % ³											
Total meat consumption	-	-20%	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%	-90%	-100%
Processed meat	-	427%	353%	295%	244%	203%	167%	135%	101%	57%	-99%
Pork and other meats	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Offal	-	246%	399%	-83%	-85%	-86%	-87%	-89%	-91%	-94%	-100%
Beef and veal	-	-68%	-94%	-100%	-	-	-	-	-	-	-
Poultry	-	98%	120%	114%	83%	52%	21%	-11%	-43%	-74%	-100%

¹ Dietary inertia was modeled using the Diet Departure criterion.

² In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value. Total meat consumption at the bound (*i.e.*, corresponding to a limiting constraint) is in white on a black background.

³ Percent increase or decrease at each step is relative to the observed diet.

SUPPLEMENTAL TABLE 7. Absolute daily food group consumptions under modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

Diet composition, g/d	Males											
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%)										
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
Vegetables	176	235	279	333	400	400	400	400	400	400	400	400
Fresh fruits	128	194	286	368	416	453	453	452	452	453	453	453
Dried fruits	1	19	5	0	0	0	0	1	1	0	0	0
Processed fruits: compotes and cooked fruits	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nuts, seeds and oleaginous fruits	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Bread and refined bakery products	168	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Complete and semi-complete bread and bakery products	11	99	97	94	93	92	93	90	92	96	97	97
Other refined starches	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Other complete and semi-complete starches	4	118	128	142	162	190	219	255	276	276	276	276
Starch-based products, sweet/fat processed	22	17	16	15	14	13	12	12	12	12	12	12
Salt/fat processed starch products	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Potatoes and other tubers	79	90	90	92	96	101	101	101	102	104	105	105
Legumes	13	15	15	15	15	15	15	15	15	16	16	16
Poultry	30	95	98	102	93	78	62	47	31	15	0	0
Beef and calves	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pork and other meats	27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Offal	4	10	7	5	3	2	2	1	1	1	0	0
Processed meat	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oily fish	8	20	19	19	18	26	16	15	15	16	24	24
Other fish	22	10	10	11	11	7	17	16	16	16	7	7
Mollusks and crustaceans	5	5	6	7	9	14	20	28	28	28	28	28

Diet composition, g/d	Males										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%)									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Eggs and egg-based dishes	14	17	17	18	19	21	22	23	24	25	28
Milk	84	100	102	105	110	130	128	123	125	129	134
Fresh natural dairy products	31	89	90	91	91	97	97	97	98	100	102
Fresh sweetened dairy products	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sweet milky desserts	19	19	20	19	18	18	18	19	19	20	21
Cheeses	49	36	35	35	34	34	34	33	33	34	34
Animal fats and assimilated fats	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Butters and light butters	10	9	9	9	9	9	9	9	9	10	10
Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid	0	22	22	22	23	23	23	23	24	22	22
Vegetable fats low in alpha-linoleic acid	12	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3
Sauces and fresh creams	35	29	28	26	25	24	23	22	22	21	21
Sweet products or Sweet and fatty products	103	97	96	84	70	62	61	61	61	61	61
Drinking waters	1007	979	975	972	968	964	962	958	956	955	953
Sweetened soda type drinks	141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fruit juices	80	78	50	35	27	22	20	18	17	15	14
Hot drinks	494	494	438	397	317	0	0	0	0	0	0
Salt	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Condiments	4	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
Aromatic herbs, Spices except salt	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Soups	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bouillons	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Substitutes of animal products	3	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4
Other foods	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Alcoholic drinks	216	216	216	192	191	186	186	186	186	186	186

SUPPLEMENTAL TABLE 7 cont. Absolute daily food group consumptions under modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

Diet composition, g/d	Females											
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%)										
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
Vegetables	160	226	269	324	387	387	387	387	387	387	387	387
Fresh fruits	107	123	177	180	335	333	332	331	330	330	330	330
Dried fruits	1	53	53	22	24	26	28	28	29	29	29	29
Processed fruits: compotes and cooked fruits	15	0	0	102	0	0	0	0	0	0	0	0
Nuts, seeds and oleaginous fruits	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Bread and refined bakery products	115	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Complete and semi-complete bread and bakery products	15	118	118	120	119	122	124	128	133	139	146	146
Other refined starches	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Other complete and semi-complete starches	4	96	104	116	127	141	157	179	188	188	188	188
Starch-based products, sweet/fat processed	19	18	18	18	17	17	17	16	16	16	16	15
Salt/fat processed starch products	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Potatoes and other tubers	49	58	60	62	62	62	62	62	63	63	63	63
Legumes	6	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Poultry	31	62	69	67	58	48	38	28	18	8	0	0
Beef and calves	28	9	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pork and other meats	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Offal	1	4	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Processed meat	30	7	6	5	4	4	3	3	3	2	0	0
Oily fish	6	22	21	19	19	18	16	16	16	16	16	16
Other fish	15	10	14	20	20	21	21	21	21	20	20	20
Mollusks and crustaceans	4	6	8	11	14	19	25	26	26	26	26	26

Diet composition, g/d	Females											
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%)										
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%	
Eggs and egg-based dishes	14	20	23	26	28	29	30	31	32	34	35	
Milk	75	109	110	127	128	127	125	124	123	122	122	
Fresh natural dairy products	33	99	101	109	111	111	111	111	111	111	111	
Fresh sweetened dairy products	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sweet milky desserts	16	16	16	17	17	18	18	18	19	19	19	
Cheeses	36	28	28	28	27	27	27	27	26	26	26	
Animal fats and assimilated fats	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Butters and light butters	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid	0	17	17	17	17	17	17	17	17	17	18	
Vegetable fats low in alpha-linoleic acid	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Sauces and fresh creams	32	27	25	24	22	22	21	20	20	19	19	
Sweet products or Sweet and fatty products	83	69	69	69	68	67	67	66	66	65	65	
Drinking waters	929	912	909	907	905	904	902	901	900	899	898	
Sweetened soda type drinks	140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Fruit juices	67	135	69	48	37	31	26	23	20	18	17	
Hot drinks	507	507	420	0	0	0	0	0	0	0	0	
Salt	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Condiments	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Aromatic herbs, Spices except salt	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Soups	75	62	50	46	39	35	31	29	27	26	25	
Bouillons	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Substitutes of animal products	5	6	6	7	6	6	6	6	6	6	6	
Other foods	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
Alcoholic drinks	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	

SUPPLEMENTAL TABLE 8. Standardized dual values showing the relative influences of the limiting constraints in modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

	Males									
	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ¹									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Dual values of nutrient constraints ²										
Vitamin A	3.11	0.21	0.07	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	0.19	0.19	0.54	0.59	1.10
Vitamin C	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Bioavailable Iron	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Iodine	2.42	0.20	0.23	0.27	1.19	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Potassium	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Sodium	-8.01 ³	-1.39	-1.39	-1.46	-1.43	-1.48	-1.48	-0.77	-0.60	-0.97
Saturated fatty acids	-2.73	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Lauric + myristic + palmitic acids	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Linoleic acid	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	0.07	0.08	0.13
α -linolenic acid	4.03	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
EPA+DHA ⁴	[0.001-0.01]	0.02	0.01	0.01	[0.001-0.01]	0.03	0.03	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Sugar excluding lactose	-0.39	-0.03	-1.15	-1.98	-1.66	-0.04	-0.04	-0.05	-0.06	-0.17
Fiber	1.38	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]

¹ In each x% modeled scenario, total meat consumption is diminished by at least x% of its observed value.

² Standardized dual values representing the potential effect on the objective function of a 100% relaxation of the limiting bound of the constraint considered, in order to classify the nutritional constraints from the most to the least limiting (*i.e.*, active). Limiting constraints have a positive (negative) value if the lower (upper) bound is binding. Only nutrients with a limiting constraint (*i.e.* a non-null dual value) are presented here. Dual values are indicated as [0.001-0.01] when values are between 0.001 and 0.01.

³ For each step, the most limiting constraint (*i.e.*, with the highest absolute value) is in bold.

⁴ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

SUPPLEMENTAL TABLE 8 cont. Standardized dual values showing the relative influences of the limiting constraints in modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

Dual values of nutrient constraints ²	Females									
	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ¹									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Vitamin A	3.58	[0.001-0.01]	0.08	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Vitamin C	[0.001-0.01]	0.23	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Bioavailable iron	1.54	1.44	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Iodine	6.52	0.43	1.15	0.22	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Potassium	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	0.14	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Sodium	-8.02 ³	-1.73	-1.34	-1.49	-1.00	-0.93	-0.93	-0.85	-0.82	-0.75
Saturated fatty acids Lauric + myristic + palmitic acids	-4.62	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Linoleic acid	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	0.08
α -linolenic acid	3.97	0.01	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	0.05	0.05	0.03	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
EPA+DHA ⁴	[0.001-0.01]	0.05	0.05	0.04	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Sugar excluding lactose	-1.54	-0.21	-0.15	-0.09	-0.10	-0.09	-0.09	-0.10	-0.10	-0.09
Fiber	4.06	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]

¹ In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value.

² Standardized dual values representing the potential effect on the objective function of a 100% relaxation of the limiting bound of the constraint considered, in order to classify the nutritional constraints from the most to the least limiting (*i.e.*, active). Limiting constraints have a positive (negative) value if the lower (upper) bound is binding. Only nutrients with a limiting constraint (*i.e.* with a non-null dual value) are presented here. Dual values are indicated as [0.001-0.01] when values are between 0.001 and 0.01.

³ For each step, the most limiting constraint (*i.e.*, with the highest absolute value) is in bold.

⁴ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

SUPPLEMENTAL TABLE 9. Protein and amino acid intakes ($\text{mg}\cdot(\text{kg}\cdot\text{bw}\cdot\text{d})^{-1}$) in observed and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females) ¹

Nutrients	EAR ²	97.5% intake (EAR + 2 SD)	Males										
			Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ³									
				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Aspartic acid + asparagine	-	-	117	106	108	111	111	109	106	103	99	95	91
Alanine	-	-	65	56	56	57	56	55	53	51	49	46	43
Arginine	-	-	73	65	66	68	66	65	63	61	59	56	53
Methionine + Cysteine	15	19	53	43	43	44	43	42	41	41	39	37	36
<i>Methionine</i>	-	-	34	27	27	27	27	26	25	25	23	22	21
<i>Cysteine</i>	-	-	19	16	16	17	16	16	16	16	16	15	15
Glutamic acid + glutamine	-	-	275	241	244	248	246	244	243	241	238	232	226
Glycine	-	-	54	47	48	48	47	46	45	44	42	40	38
Histidine	10	12	39	32	32	33	32	32	31	30	28	27	26
Isoleucine	20	25	59	51	52	53	52	51	49	48	46	44	42
Leucine	39	48	106	91	92	94	92	90	88	85	82	79	75
Lysine	30	37	89	79	80	82	80	77	74	70	66	61	57
Phenylalanine + Tyrosine	25	31	106	92	93	95	93	91	90	88	85	82	79
<i>Phenylalanine</i>	-	-	60	52	53	54	53	52	51	51	49	48	46
<i>Tyrosine</i>	-	-	46	40	40	41	40	39	38	37	36	34	33
Proline	-	-	94	84	84	85	84	84	84	84	84	82	81
Serine	-	-	61	55	56	56	56	55	55	54	53	51	50
Threonine	15	19	54	46	47	47	46	45	44	43	41	39	37
Tryptophan	4	5	16	14	15	15	15	14	14	14	14	13	13
Valine	26	32	69	60	61	62	61	60	58	57	55	53	51
Protein	660	818	1 354	1 185	1 201	1 221	1 205	1 185	1 164	1 141	1 107	1 066	1 023

¹ Intakes ($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$) were converted to $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ body weight/day for a mean body weight of 77.4 kg for males. To account for the slightly lower average digestibility of plant protein, protein intake from plants was reduced by 5% when calculating total protein and amino acid intakes, as previously described in the Methods section (L122-L123). INCA3, Individual and National Consumption Survey 3 ($n = 1\ 125$).

² EAR, Estimated average requirement. Estimated average requirement of adults for protein and indispensable amino acids, based on the Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition (2002) (5).

³ In each x% modeled scenario, total meat consumption was reduced by at least x% of its observed value.

SUPPLEMENTAL TABLE 9 cont. Protein and amino acid intakes (mg·(kg_bw·d)⁻¹) in observed and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females) ¹

Nutrients	EAR ²	97.5% intake (EAR + 2 SD)	Females										
			Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ³									
				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Aspartic acid + asparagine	-	-	101	112	115	114	115	113	112	109	106	102	99
Alanine	-	-	55	58	60	59	59	57	57	55	53	51	49
Arginine	-	-	63	69	71	69	69	68	68	66	64	61	59
Methionine + Cysteine	15	19	45	47	47	47	46	46	46	45	44	43	42
<i>Methionine</i>	-	-	28	29	29	29	29	28	28	27	26	25	24
<i>Cysteine</i>	-	-	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18	17
Glutamic acid + glutamine	-	-	240	259	264	265	267	266	266	266	264	260	258
Glycine	-	-	46	50	51	50	49	49	48	47	46	44	43
Histidine	10	12	33	34	34	34	34	33	33	32	31	30	28
Isoleucine	20	25	51	54	56	55	55	54	54	52	51	49	48
Leucine	39	48	91	97	99	99	98	96	95	93	91	88	85
Lysine	30	37	77	82	84	84	83	80	78	75	71	68	65
Phenylalanine + Tyrosine	25	31	92	98	100	99	99	98	97	95	93	91	88
<i>Phenylalanine</i>	-	-	52	56	57	56	57	56	56	55	54	53	52
<i>Tyrosine</i>	-	-	40	42	43	43	42	42	41	40	39	37	36
Proline	-	-	82	90	91	91	92	92	93	93	93	92	91
Serine	-	-	54	59	60	60	61	60	60	60	59	57	57
Threonine	15	19	46	49	50	49	49	48	48	46	45	43	42
Tryptophan	4	5	14	15	16	16	16	16	16	15	15	15	14
Valine	26	32	60	64	66	65	65	64	64	63	61	60	58
Protein	660	818	1 169	1 250	1 277	1 265	1 262	1 243	1 227	1 206	1 179	1 148	1 122

¹ Intakes ($\text{mg}\cdot\text{d}^{-1}$) were converted to $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ body weight/day for a mean body weight of 66.0 kg for females. To account for the slightly lower average digestibility of plant protein, protein intake from plants was reduced by 5% when calculating total protein and amino acid intakes, as previously described in the Methods section (L122-L123). INCA3, Individual and National Consumption Survey 3 ($n = 1125$).

² EAR, Estimated average requirement. Estimated average requirement of adults for protein and indispensable amino acids, based on the Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition (2002) (5).

³ In each x% modeled scenario, total meat consumption was reduced by at least x% of its observed value

SUPPLEMENTAL TABLE 10. Iron intakes, iron bioavailability, bioavailable iron, zinc intakes, zinc bioavailability and bioavailable zinc in observed and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males and females (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

		Men										
		Observed diet	Modeled diets ¹									
Nutrient	Unit		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Iron	mg·d ⁻¹	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Bioavailable Iron	mg·d ⁻¹	1.68	1.20	1.21	1.20	1.20	1.31	1.31	1.31	1.29	1.26	1.23
Iron bioavailability	%	13%	9%	9%	9%	9%	10%	10%	10%	10%	9%	9%
Zinc	mg·d ⁻¹	12	10	10	10	10	10	10	11	11	11	11
Bioavailable zinc	mg·d ⁻¹	3.6	2.9	2.9	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7
Zinc bioavailability	%	30%	30%	30%	29%	28%	28%	27%	26%	26%	26%	26%

		Women										
		Observed diet	Modeled diets ¹									
Nutrient	Unit		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Iron	mg·d ⁻¹	10	12	12	11	12	12	12	12	13	13	13
Bioavailable Iron	mg·d ⁻¹	1.21	1.16	1.16	1.17	1.22	1.22	1.22	1.21	1.20	1.19	1.17
Iron bioavailability	%	12%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	10%	9%	9%
Zinc	mg·d ⁻¹	9	9	9	9	9	10	10	10	10	10	10
Bioavailable zinc	mg·d ⁻¹	3.2	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8	2.9	2.8	2.8	2.8	2.8
Zinc bioavailability	%	36%	31%	31%	30%	29%	29%	28%	27%	27%	27%	27%

¹ In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value.

SUPPLEMENTAL METHOD 1 French amino acid database

An amino acid (AA) database was developed for the 1761 food items in the full repertoire of adults in the INCA3 study, using both the method described here and the database developed by de Gavelle et al. (6).

Sources of AA content

The AA contents of different food items were collected from published French sources (7) and international databases (8). These data came from analytical data on AA obtained using automated AA analyzers (involving ion-exchange chromatography) or high-performance liquid chromatography (HPLC).

Assignment to INCA3 food items

To assign the AA contents of the foods analyzed to INCA3 food items, we used a step procedure as follows:

Step 1: Direct analytical data from French published sources

Very few analyses had been performed on French foods using chromatographic methods to analyze 18 AAs. Data from a study on the nutritional value of meat by the *Centre d'Information des Viandes* were used for most of the beef, veal, lamb, horse meat and offal food items (7).

Step 2: Data based on "similar" food items

When no direct analytical data corresponded to INCA3 food items, assignments were made using "similar" food items. Firstly, if data were available on a different form of the same food (*e.g.* cooked and not raw), we hypothesized that the AA profiles of the proteins were not modified by the cooking processes and the data for the different form of the same food were assigned to the INCA3 food items. Then, if data were unavailable for a food item but existed for similar species (*e.g.* food from different cuts of the same animal), we assigned the similar food to the INCA3 food item. In order to compare AA profiles between different foods, we conducted our analyses in mg per gram of total nitrogen ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{N}_{\text{tot}}$).

Step 3: Use of recipes to break down mixed food items

Mixed INCA3 food items for which no data were found (*e.g.* chili con carne or lasagna) were broken down into ingredients using the INCA3 recipe table, and the food item AA content was calculated as a combination of the AA contents of its ingredients.

Step 4: Assignment to 0 for foods containing very little or no protein

The AA content of some INCA3 food items was assigned to 0 as these foods contained very low or no protein levels (*e.g.* oil or alcoholic beverages).

Calculation of the AA contents of foods

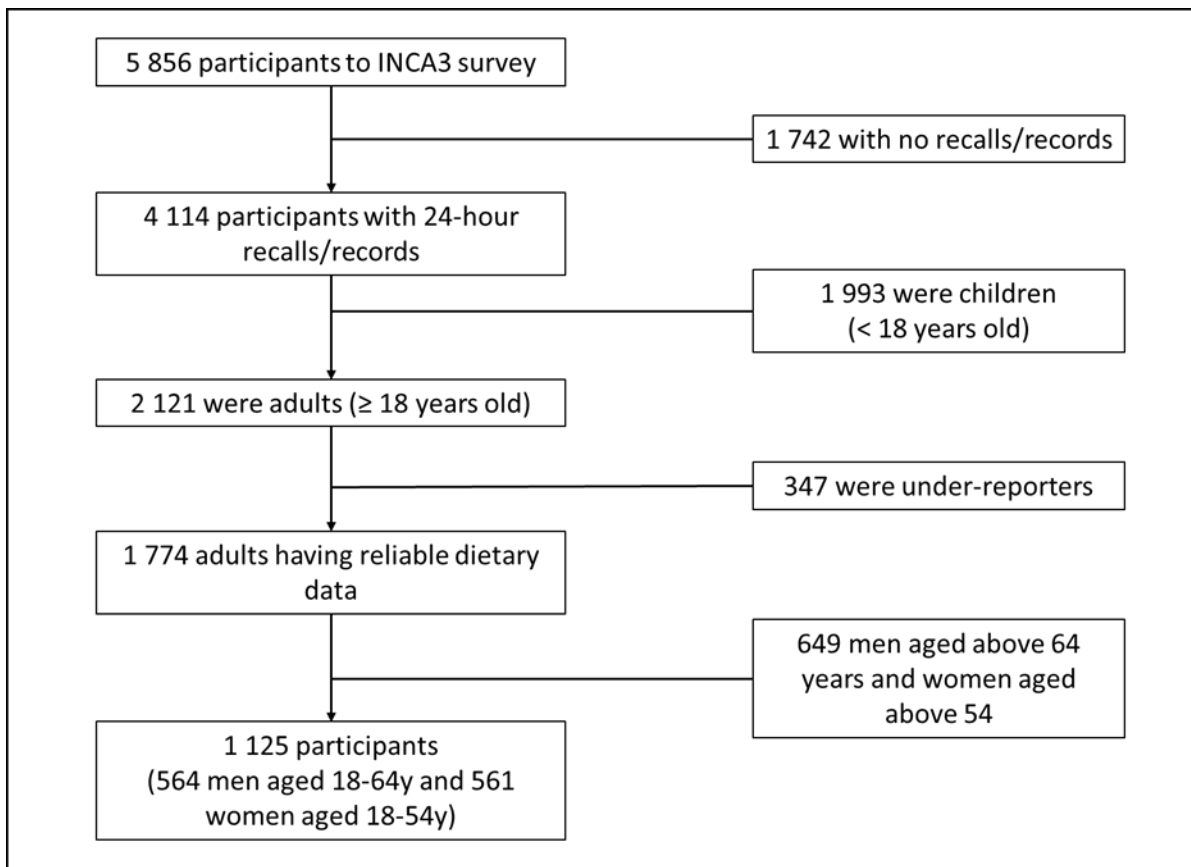
AA profile data formatting

We used the 2016 nutritional composition database from the French *Centre d'Information sur la Qualité des Aliments; CIQUAL* (9) for protein content, which we multiplied by the AA contents (in $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\text{N}_{\text{tot}}$) of the databases from which the data were borrowed. The CIQUAL table expresses protein content in grams per 100 grams of food. For database matching, a conversion was therefore necessary and was carried out using the following formula:

$$\text{AA (mg/100g of food)} = \frac{\text{AA (mg/g N}_{\text{tot}}) * \text{protein (g/100g of food)}}{\text{Jones' Factor}}$$

The Jones factor used is from the USDA database (8).

SUPPLEMENTAL FIGURE 1 Flow chart explaining the sampling of French participants from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3) for the present study

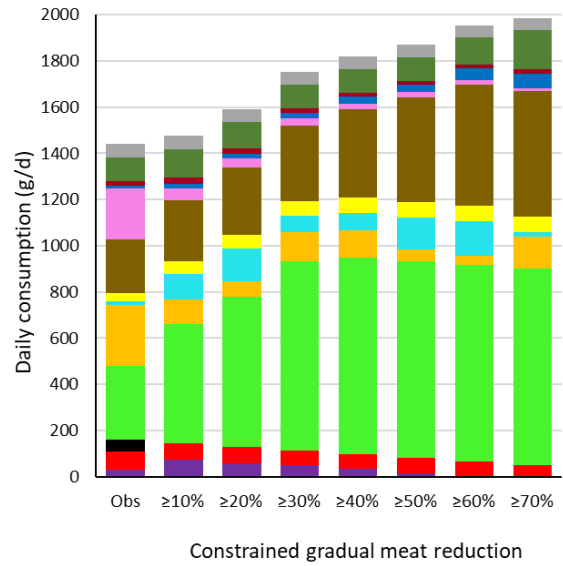


SUPPLEMENTAL FIGURE 2. Average daily consumption of food groups in observed (Obs) and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females), without flexibility on bioavailable iron and zinc.

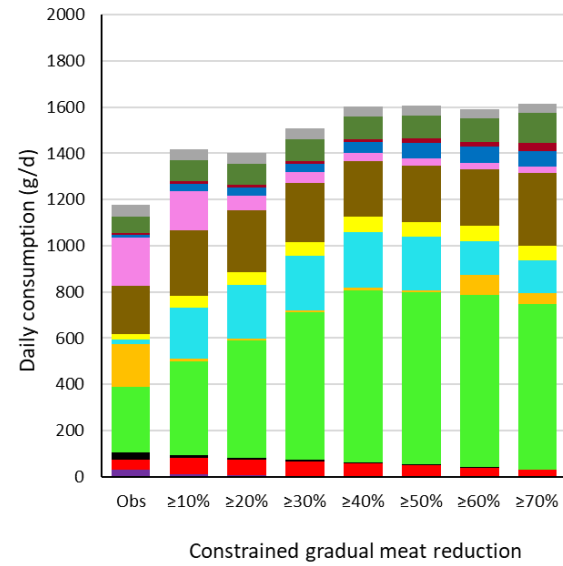
Here, the constraints on bioavailable iron and zinc were set at the current reference values and no flexibility on those reference values was introduced. Modeled diets could be identified up to the 70% step of the meat reduction transition, whatever the sex. Beyond this step, modeled diets could no longer be identified. Under this alternative option, the reference values for bioavailable iron and zinc were set at the current reference values (*i.e.* 1.72 mg/d for both sexes for bioavailable iron, 3.63 g/d in males and 3.23 g/d in females for bioavailable zinc).

In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value. For clarity, the 45 modeled food groups are not shown here but were grouped into broader categories included in the *Healthy Dietary Pattern* criterion (such as red meat, processed meat, soft drinks, grain products, fruit and vegetables) or represented other protein sources (such as poultry, seafood, dairy products, eggs, legumes and nuts). The remaining food groups were grouped as "others" (8 groups) and "other drinks" (3 groups) and are not presented in Supplemental Figure 2. Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2.

A. Males



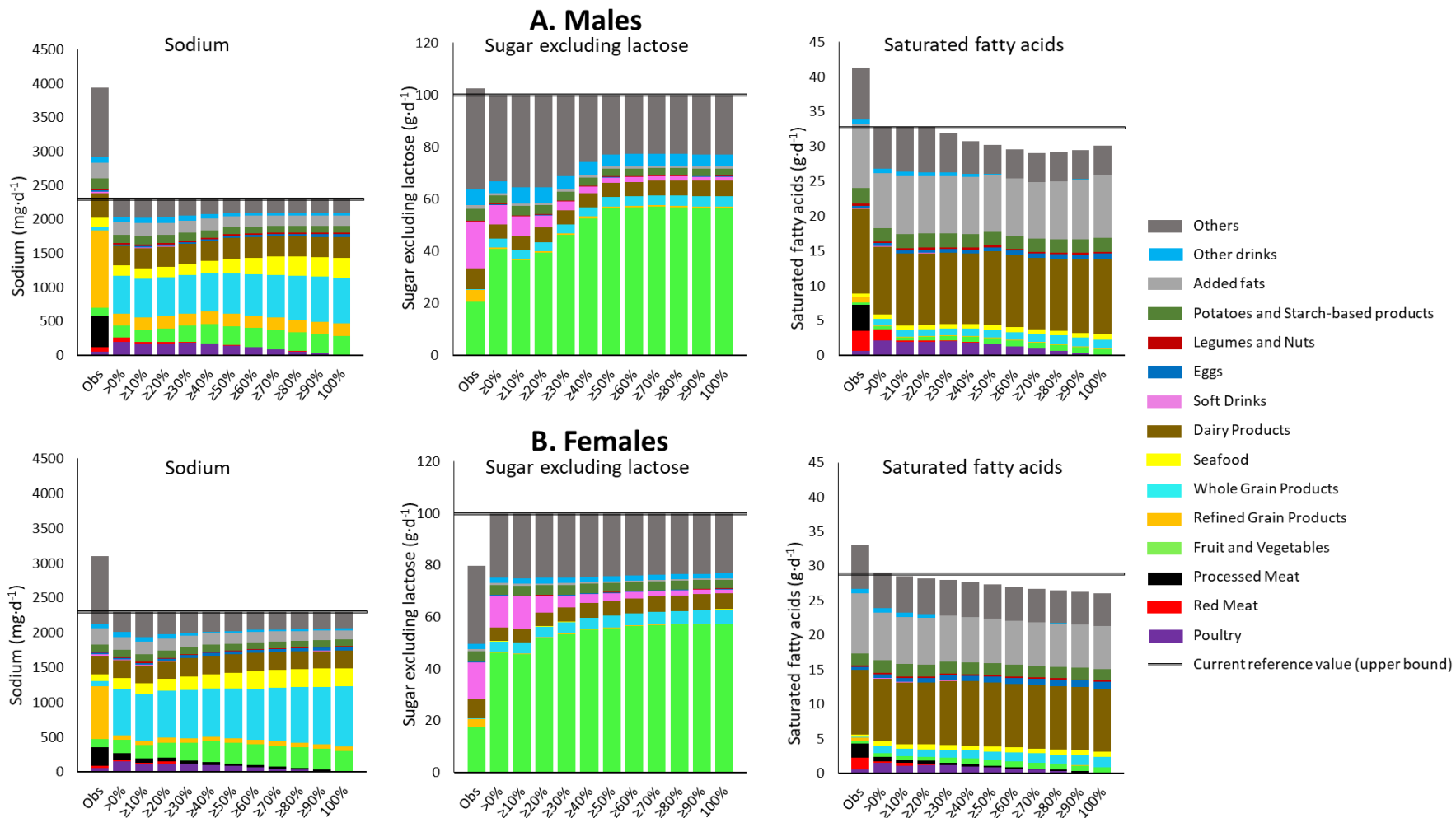
B. Females

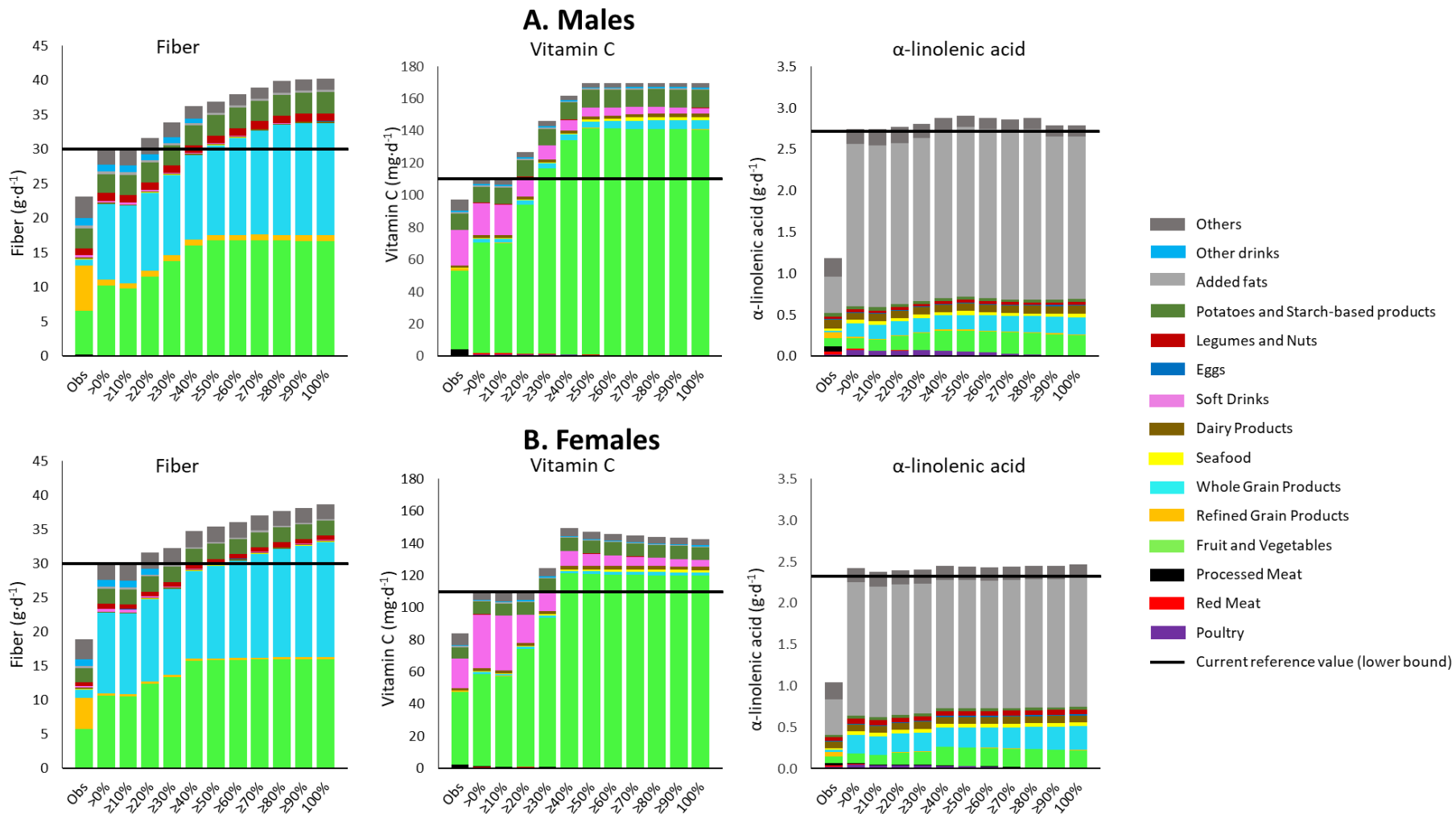


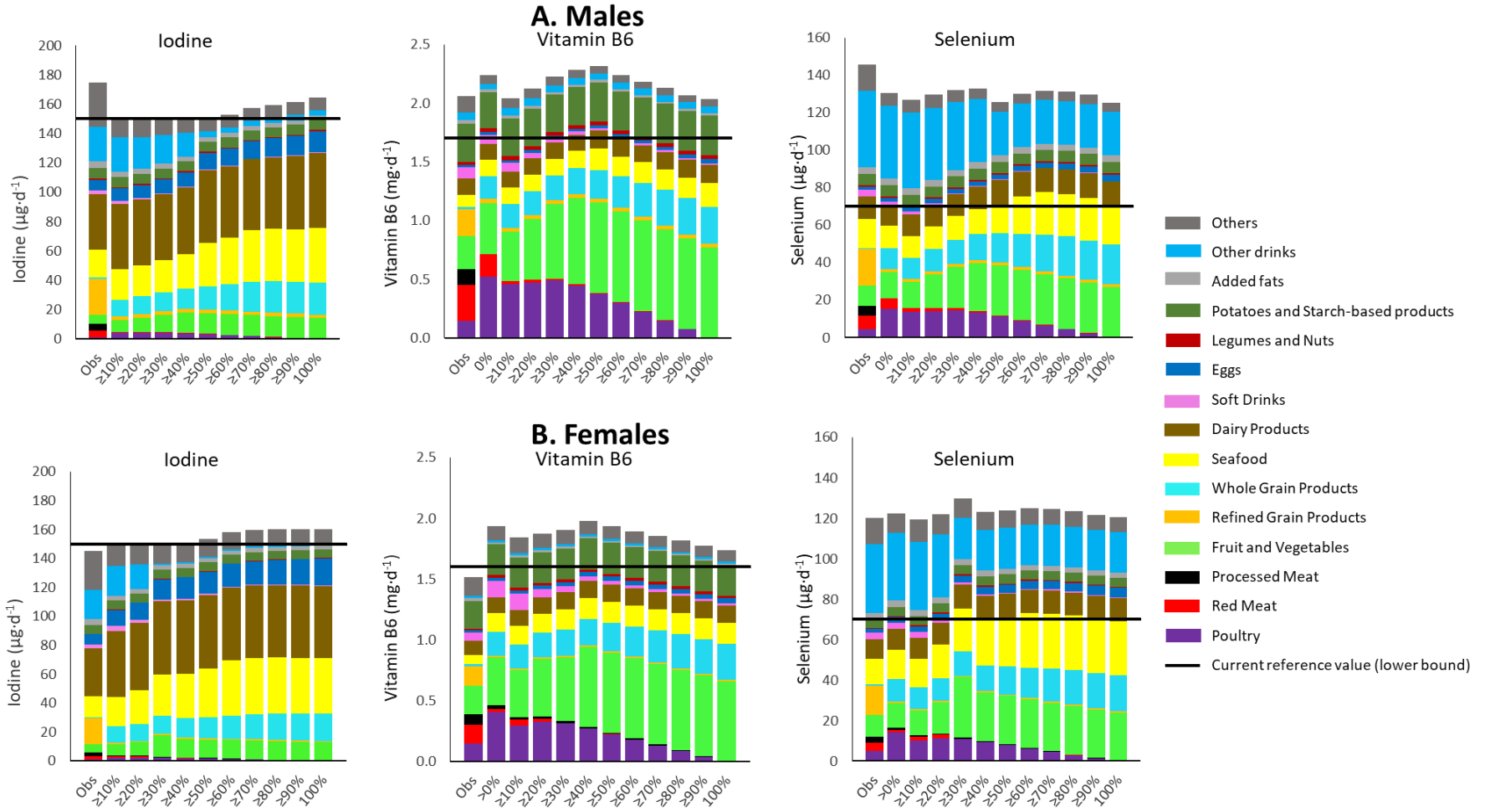
- Added fats
- Potatoes and Starch-based products
- Legumes and Nuts
- Eggs
- Soft Drinks
- Dairy Products
- Seafood
- Whole Grain Products
- Refined Grain Products
- Fruit and Vegetables
- Processed Meat
- Red Meat
- Poultry

SUPPLEMENTAL FIGURE 3. Contribution of food groups to sodium, sugars excluding lactose, saturated fatty acids, fiber, vitamin C, α -linolenic acid, iodine, vitamin B6 and selenium in observed (Obs) and modeled diets as optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a sequential transition towards diets containing less meat, according to gradual constraints for meat reduction (from at least 10% to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

In each x% modeled scenario, total meat consumption was diminished by at least x% of its observed value. For clarity, the 45 modeled food groups are not shown here but were grouped into broader categories included in the *Healthy Dietary Pattern* criterion (such as red meat, processed meat, soft drinks, grain products, fruits and vegetables) or that represented other protein sources (such as poultry, seafood, dairy products, eggs, legumes and nuts), and the remaining food groups were grouped as "others" (8 groups) and "other drinks" (3 groups). Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2. For each nutrient, current reference values are represented by horizontal lines.







References

1. 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.
2. 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. *Advances in Nutrition* 2021;12:590–9.
3. 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—a diet optimization study in French adults. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2021;nqab373.
4. Opinion of the French Food Safety Agency on the benefits/risks of fish consumption. French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses) 2008;Saisine n°2008-SA-0123:31.
5. Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition (2002 : Geneva S, Nations F and AO of the U, Organization WH, University UN. Protein and amino acid requirements in human nutrition : report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation [Internet]. World Health Organization; 2007 [cited 2021 Oct 15]. xi, 265 p. Available from: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43411>
6. De Gavelle E, Huneau J-F, Bianchi CM, Verger EO, Mariotti F. Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults. *Nutrients* 2017;9:1333.
7. Nutritional values of meats, 2006-2009 [Internet]. The French Meat Information Center & INRAE; [cited 2021 Jul 12]. 42 p. Available from: <http://www.lessentiellesviandes-pro.org/pdf/PDF-tous%20morceaux.pdf>
8. USDA Branded Food Products Database . Nutrient Data Laboratory Home Page [Internet]. U.S. Department of Agriculture ARS; 2021 [cited 2021 Jul 12]. Available from: <http://ndb.nal.usda.gov>

9. The ANSES-CIQUAL food composition table [Internet]. 2016 [cited 2021 Jun 22]. Available from:
<https://ciqual.anses.fr/#>

II.3. Projet n°3 : Moyens diététiques permettant de réduire et d'éliminer la viande de ruminants dans des régimes sains et nutritionnellement adéquats, et repercussions en termes de pressions environnementales associées aux régimes

a. Résumé

Contexte : Des changements dans les régimes alimentaires peuvent fournir des gains pour la santé et l'environnement, et la viande de ruminants a été désignée comme une clé de voute à cet égard.

Objectifs : Notre premier objectif était d'analyser l'importance intrinsèque de la viande de ruminants dans le système diétético-nutritionnel. Le deuxième objectif de l'étude était de concevoir des régimes avec une réduction progressive de la viande de ruminants afin d'identifier les problèmes nutritionnels les plus saillants et les leviers alimentaires efficaces possibles pour surmonter ces problèmes tout au long des transitions de réduction de la viande de ruminants jusqu'à une suppression totale. Enfin, nous avons cherché à évaluer les changements dans les pressions environnementales qui seraient associés aux régimes modélisés (par rapport aux régimes observés), notamment en ce qui concerne la réduction des émissions de GES mais aussi d'autres indicateurs d'empreinte environnementale.

Méthodes : Dans ce travail, en partant des consommations des adultes français (INCA3, $n = 1\ 125$, 18-64 ans), nous avons modélisé des transitions vers un modèle alimentaire nutritionnellement adéquat et sain selon deux scénarios : un scénario de suppression directe de la viande de ruminants sans inertie alimentaire et, à l'inverse, un scénario de réduction progressive de la consommation de viande de ruminants par paliers successifs de 10%, en utilisant l'optimisation multi-objectifs non linéaire. Nous avons identifié les caractéristiques alimentaires et nutritionnelles des régimes pauvres en viande de ruminants qui les rendraient nutritionnellement adéquats et les plus sains. Afin de décrire les modifications des pressions environnementales liées aux régimes modélisés, nous avons utilisé la base de données française d'analyse du cycle de vie (ACV) pour les aliments consommés, AGRIBALYSE® 3.0.1 (ADEME, 2020), complétée par la base européenne SHARP (Mertens *et al.*, 2019). Les incertitudes inhérentes à la base de données AGRIBALYSE® sont présentées en **annexe 3**. Plus précisément, l'**annexe 3** met en perspective les résultats relatifs aux effets de la diminution

de viande sur les émissions de GES liées à la consommation alimentaire, d'après la littérature disponible, et proposent des pistes d'analyse pouvant expliquer la moindre empreinte carbone de la viande bovine dans la base française Agribalyse par rapport à d'autres bases fondées sur une approche moins systémique.

Résultats : Dans l'ensemble, notre principale conclusion est que la viande de ruminants peut être facilement remplacée par la volaille. De telles transitions de la viande de ruminants vers la volaille s'accompagneraient d'une restructuration en profondeur du régime alimentaire vers un modèle alimentaire sain, ne contenant rapidement aucune viande transformée (-100% à l'étape de 10%) et presque aucune viande rouge non issue de ruminants, tout en augmentant progressivement les aliments d'origine végétale faisant partie de catégories alimentaires favorables à la santé, tels que les fruits et légumes et les céréales complètes. Ces transitions se traduiraient par une amélioration progressive des indicateurs environnementaux relatifs aux émissions de GES (-29% à l'étape finale) et à l'utilisation des sols (-36%), mais entraînerait une augmentation de l'utilisation des ressources en eau (47%) et une stabilité de la demande énergétique cumulée (+5%).

Conclusion : Nous concluons que la réduction de la viande de ruminants fait partie d'un dispositif transitoire consistant à remplacer la totalité de la viande rouge par de la volaille, qui peut aboutir à des régimes alimentaires sains et nutritionnellement adéquats, et alignés sur les réductions des émissions de GES.

Valorisation : Ce travail a été soumis/publié dans la revue *Journal of Cleaner Production* le 7 juin 2022.

b. Messages-clés

Messages-clés

- Des régimes alimentaires sains et nutritionnellement adéquats sans viande de ruminants ont pu être identifiés à la fois dans des scénarios de suppression directe et de réduction progressive.
- Comme le montrent les deux scénarios, la viande de ruminants a été facilement remplacée par de la volaille, tout comme l'ensemble de la viande rouge.
- Les régimes alimentaires modélisés comportaient davantage de fruits, de légumes et de céréales complètes et étaient plus sains que les régimes occidentaux typiques observés.
- Ces changements alimentaires ont également entraîné une diminution des pressions sur l'environnement, notamment des émissions de gaz à effet de serre liées à l'alimentation.

c. Article et données supplémentaires

Dietary means to reduce and remove ruminant meat in healthy and nutrient-adequate diets and final alignment with lower environmental impacts

Alison Dussiot¹, Hélène Fouillet¹, Elie Perraud¹, Marion Salom  ¹, Jean-François Huneau¹, François Mariotti¹, Emmanuelle Kesse-Guyot²

¹ Paris-Saclay University, UMR PNCA, AgroParisTech, INRAE, 91120, Palaiseau, 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: Prof. François Mariotti

Email: francois.mariotti@agroparistech.fr

Paris-Saclay University, UMR PNCA, AgroParisTech, INRAE, 22 place de l'Agronomie, 91120 Palaiseau, France

Running title: Nutrient challenges when reducing ruminant meat consumption

Number of words: 6 848

Number of Tables: 1/**Number of Figures:** 4

Supplemental material: 10 Tables, 2 methods and 8 Figures

Highlights

Nutritionally adequate and healthy food patterns without ruminant meat can be identified under scenarios of direct removal or gradual reduction.

Under both scenarios, ruminant meat and total red meat were easily replaced by poultry meat, with full adequacy regarding all nutrient intakes (while accounting for their bioavailability).

Such modeled diets also contained more fruit, vegetables and whole grain products and were healthier than observed typical Western diets.

These dietary changes led to a reduction in environmental pressures related to climate change.

Abstract

Shifts in dietary patterns are important for both health and the environment, and ruminant meat has been highlighted as a critical cornerstone in this respect. Using nonlinear and multi-objective diet optimization based on the consumption of French adults (INCA3, $n=1\ 125$, 18-64 years old), we have modeled transitions towards nutritionally adequate and healthy dietary patterns under scenarios of either the direct removal or gradual reduction (in 10% steps) of ruminant meat, without or with preserving at best dietary habits, respectively. We have identified the nutritional issues when designing diets low in ruminant meat, and the dietary levers that make them nutritionally adequate and healthy. Overall, our main finding is that ruminant meat could readily be replaced by poultry. Such a gradual transition from ruminant meat to poultry should be accompanied by an in-depth restructuring to achieve a healthy diet, involving the early removal of processed meat and non-ruminant red meat and a gradual increase in healthy plant-based foods such as fruits and vegetables (reaching 800 g/d at the final step) and whole grain products (reaching 330 g/d). In terms of its expected environmental impacts, this transition would result in a gradual improvement in greenhouse gas emissions and land use (up to -29% and -36%, respectively), without changing cumulative energy demand but requiring an increase in water use (up to +47%). We conclude that reducing ruminant meat forms part of a

transitional feature that consists in replacing all red meat with poultry, which could result in healthy and nutritionally adequate dietary patterns aligned with reductions in greenhouse gas emissions.

Keywords: nutrition; healthy dietary pattern; diet optimization; ruminant meat reduction; environmental pressures; greenhouse gas emissions

Introduction

A reduction of environmental pressures and the revision of food systems is essential in our response to climate change (Campbell et al., 2017; Crippa et al., 2021). Livestock farming, particularly of ruminants, is a well-documented and significant contributor to food-related greenhouse gas emissions (GHGe) (Clune et al., 2017; Poore and Nemecek, 2018; Temme et al., 2015). Furthermore, food products associated with marked increases in disease risks - red and processed meats - are often associated with the most damaging environmental impacts that go beyond the potential ecosystem services offered by some livestock systems (Clark et al., 2019). Consistent evidence in the scientific literature has indicated that a dietary pattern containing more plant-based foods (*e.g.*, fruits and vegetables, legumes, nuts, whole grain products) and less animal-based foods (especially red meat and dairy products) and total energy is both healthier and associated with lower pressures on the environment and natural resources (Tilman and Clark, 2014; Fresán and Sabaté, 2019; Nelson et al., 2016; Jarmul et al., 2020, 2019). Most studies that have tried to identify sustainable diets have been based on either observed consumptions or food substitution scenarios, and therefore offer no assurance that the diets identified will be nutritionally adequate. Mathematical optimization techniques can help to identify dietary patterns that will both improve nutrient adequacy and reduce environmental impacts (Wilson et al., 2019). In Western countries, part of the population has started to reduce, or is considering reducing, their consumption of animal products (and particularly meat) for environmental reasons (Allès et al., 2017; Lea et al., 2006). Average total meat intakes remain high in Europe at present, ranging from 75 g/d (Sweden) to 233 g/d (Germany) in adults (Cocking et al., 2020). Reducing meat consumption would be entirely consistent with the results of some diet optimization

studies which tried to define diets with less environmental impact (Kramer et al., 2017; Macdiarmid et al., 2012; Kesse-Guyot et al., 2021; Wilson et al., 2019). Because beef is by far the greatest contributor to greenhouse gas emissions, and climate change is among the most urgent environmental issues, reducing beef intake is on the agenda of numerous programs and is gaining in popularity as a strategy (FAO, 2021). However, few studies in the literature have evaluated how diets low in ruminant meat should be composed to render them nutritionally adequate and healthy in the context of a possible in-depth revision of the overall diet. Our first objective was to analyze the intrinsic importance of ruminant meat in the dietary-nutritional system. The second objective was to design diets involving a gradual reduction in ruminant meat consumption in order to identify the most salient nutritional problems and potential and effective dietary levers to overcome these issues during a transition of reduction towards total removal. Finally, we wanted to assess the changes in environmental pressures that might be associated with the modeled diets (compared to observed diets), notably GHGe reductions and other environmental footprint indicators.

Methods and materials

Population and data assessment

We used food consumption data on males ($n=564$, 18-64 years old) and pre-menopausal females ($n=561$, 18-54 years old) classified as non-under-reporters in the latest representative French national study (INCA3) that has been fully described elsewhere (Dubuisson et al., 2019) (see lifestyle and sociodemographic characteristics in [Supplemental Figure 1](#)). These age ranges had previously been used to establish the nutritional references applied in the present study for each gender (Anses, 2021). Food items ($n=1\ 533$) were categorized into 48 food groups ([Supplemental Table 2](#)), for which the nutrient composition was detailed using the 2016 food composition database from the French Information Centre on Food Quality ("CIQUAL," 2016). Mixed foods were broken down into ingredients and then gathered into food groups. Categorization within meats distinguished between poultry, beef and veal, pork and other non-ruminant meats, lamb, non-ruminant offal, ruminant offal, non-ruminant

processed meat, ruminant processed meat. The nutrient content of each food group was calculated, for each gender, as the mean nutrient content of food items constituting the food group weighted by their mean intake in the considered gender (Dussiot et al., 2021).

In order to describe changes to environmental pressures (food-related GHGe, land use, water use, and cumulative energy demand) related to the modeled diets (compared with observed diets), we used the French Life Cycle Assessment (LCA) Database for food items as consumed, AGRIBALYSE® 3.0.1 (ADEME, 2020). The methodological approach (representativeness, system definition and allocation) for the evaluation of environmental impact indicators has been described elsewhere (ADEME, 2020; Koch and Salou, 2014; Colomb et al., 2015) (see summary in [Supplemental Method 1](#)). The SHARP database was used to complete some of the missing GHGe data (Mertens et al., 2019). GHGe were expressed in kilograms of carbon dioxide equivalent (kg CO₂ eq). Land use referred to the use and transformation of land (dimensionless), while water use concerned the local scarcity of water and was expressed in cubic meters of water (m³ depriv). Cumulative energy demand covered the use of non-renewable fossil resources such as coal, oil, and gas, expressed in MJ.

Multi-criteria diet optimization

Modeled diets were identified by multi-criteria optimization under constraints, the aim being to obtain a maximal health profile with minimal deviation from the current diet, under the constraint of covering all gender-specific nutrient references and remaining within current consumption limits, where the decision variables were the daily consumption of food groups. Diet modeling and optimization was conducted using SAS software and its NLP algorithm for nonlinear optimization under the OPTMODEL procedure (SAS Institute®, Inc., Cary, NC, USA, version 9.4). As previously described (Dussiot et al., 2021), the health profile was estimated using the *Healthy Dietary Pattern (HDP)* criterion, which sets dietary objectives based on epidemiological studies that have evaluated associations between food group consumption and chronic disease risk (Anses, 2016) as used to prepare French dietary guidelines (Mariotti et al., 2021). It aimed to limit the consumption of red meat such as beef and veal, pork and other meats (including game, rabbit, and horse meat), and offal, and also that of processed meats and

soft drinks, while promoting the consumption of vegetables, fruits and whole grain products. The *HDP* criterion was expressed and maximized as follows:

$$\text{Max } HDP = \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\text{Opt}(i)}{\text{P95}(i)} \right] - \sum_{j=1}^3 \left[\frac{\text{Opt}(j)}{\text{Max}(j)} \right]$$

where *i* denotes the food groups to be increased (vegetables, fruits, and whole grain products), *j* denotes the food groups to be decreased (red meat, processed meat and soft drinks), *Opt*(*i*) and *Opt*(*j*) are the gender-specific optimized intakes of food groups *i* and *j*, respectively (in g/d), *P95*(*i*) is the current 95th gender-specific percentile intake of food group *i* (in g/d), and *Max*(*j*) is the upper limit of intake for food group *j* (in g/d). The upper limit of intakes for red meat, processed meat and soft drinks were 71, 25, and 263 g/d, respectively, as defined by the French Agency for Food, Environmental, and Occupational Health Safety (ANSES) (Mariotti et al., 2021).

We also evaluated how the modeled diets deviated from current diets, using the *Diet Departure* (*DD*) criterion in order to account for dietary inertia (Kramer et al., 2018). The *DD* criterion was expressed and minimized as follows:

$$\text{Min } DD = \sum_{k=1}^n \left[\frac{\text{Obs}(k) - \text{Opt}(k)}{\text{SD}(k)} \right]^2$$

where *k* is the number of food groups, *Obs*(*k*) and *Opt*(*k*) are the observed and optimized gender-specific consumptions of food group *k* (in g/d), respectively, standardized by dividing by *SD*(*k*), the current gender-specific standard deviation of the consumption of food group *k*. At each step of the gradual reduction in ruminant meat consumption, *DD* was calculated with reference to consumption at the previous step, so that only efforts made progressively throughout the transition would be considered.

As some food groups were considered to be more easily substitutable, they were grouped together in *DD* so that their substitutions would not be weighted in *DD*. Such non-penalized substitutions were between different kinds of fruits (fresh/dried/processed), breads (refined/whole grain), other starch-based products (refined/whole grain), vegetable fats (low/high in α -linolenic acid), meat (poultry/red

meat, excluding offal), soft drinks (drinks with added sugar/fruit juices), fish (oily/lean), fresh dairy products (natural/sweetened), and soups/bouillons.

The optimization procedure consisted in maximizing *HDP* while minimizing *DD* without specific weighting (1:1), as previously performed by us (Dussiot et al., 2021) and before that by the ANSES (Mariotti et al., 2021).

Nutritional and acceptability constraints

To obtain nutritionally adequate modeled diets, we used a set of nutritional constraints related to 32 nutrients (Supplemental Table 3). These gender-dependent constraints with lower and/or upper bounds were based on all the latest reference values from ANSES (Anses, 2021). One exception was vitamin D, for which we did not set any lower constraint because the reference value is known to be far too high to be reached in diet optimization (Dussiot et al., 2021; Mariotti et al., 2021). We also constrained total energy intake at within $\pm 5\%$ of the estimated mean energy requirement of French adults.

To account for the lower digestibility of plant proteins, a 5% penalty was applied to protein intake from plant protein food items, as previously described (de Gavelle et al., 2018). For iron and zinc, the reference values were based on bioavailable iron and zinc calculated from dietary intakes and the equations available regarding their absorption (Hallberg and Hulthen 2000, Miller et al. 2007, Armah et al. 2013, Dussiot et al. 2021) (Supplemental Method 2). Regarding the nutrient constraints for bioavailable iron and zinc, we used threshold values lower than the current reference values, corresponding to a deficiency prevalence of 5% in each gender (Supplemental Table 3), because such flexibility would enable the identification of diets being apparently healthier overall, with a better balance in terms of Disability Adjusted Life Years (DALYs) averted due to less chronic diseases despite a higher prevalence of iron-deficiency anemia (Dussiot et al., 2021). Flexibility was introduced by adding variables to the *HDP* and *DD* terms of the objective function goal that would minimize any violation of the relaxed constraints related to bioavailable iron and zinc.

Furthermore, acceptability constraints were used to maintain the modeled intakes by food group within the range observed for each gender (Supplemental Table 4). The acceptability constraints included lower and upper values corresponding to the 5th or 95th gender-specific percentiles of consumption for all food groups, except those with an upper limit set as a dietary constraint (red meat, processed meat, soft drinks, total fish, and oily fish). In the same way as for the *DD* criterion, the most substitutable food groups in the acceptability constraints (see above) were grouped in order to define their lower and upper bounds as the 5th or 95th gender-specific percentiles of their total consumption. Some dietary constraints were also applied to the food groups included in the *HDP* criterion whose consumption was to be reduced: red meat (beef and veal/pork and other meats/offal), processed meat and soft drinks (sugar-sweetened beverages and fruit juice) were limited to the maximum values used in the *HDP* criterion of 71 g/d, 25 g/d, and 263 g/d, respectively (Mariotti et al., 2021). Moreover, in order to take account of French dietary guidelines on fish consumption (Anses, 2008), we added two additional constraints to limit total fish consumption to 39 g/d and oily fish consumption to 26 g/d. We estimated the dual values associated with each constraint, *i.e.*, the potential gain in the objective function that would result from relaxing the limiting bound of the considered constraint by one unit. All constraints were standardized on the value of their limiting bounds, so that the standardized dual values (representing the effect of a 100% relaxation of the limiting bound) could be compared numerically with each other, and the limiting constraints for nutrient and food group intakes could be classified from the most to the least limiting, as previously explained (Dussiot et al., 2021).

Diet optimization scenarios

We first of all applied a preliminary optimization model that consisted in maximizing the *HDP* criterion only, without forcing a reduction in ruminant meat (direct scenario). We then conducted a multi-criteria optimization on both *HDP* and *DD* when modeling a gradual transition towards diets containing less and less ruminant meat (gradual scenario involving iterative reductions of 10%). Both the direct and gradual scenarios included compliance with all nutritional, acceptability and dietary constraints. The gradual scenario included an additional constraint for a gradual reduction in total ruminant meat

(beef and veal, lamb, ruminant offal, and ruminant processed meat), which was forced to be equal to 100%-x% of its previous value in a stepwise manner from x=0% to 100% (by successive steps of 10% increments in x, until the diets were devoid of ruminant meat). In addition, under the gradual scenario, we added a constraint for the non-degradation of *HDP*, so that it could only increase or remain the same as the previous step. As a complementary analysis, we ran the two scenarios (direct and gradual) again while adding a coproduction constraint linking ruminant meat and dairy products, by considering that 10 g of beef corresponded to 1 L milk, 1 L milk to 1 kg fresh dairy products and 8 L milk to 1 kg cheese, as previously described (Kesse-Guyot et al., 2021).

Results

Direct optimization scenario

In the observed INCA3 diets, total and ruminant meat consumption differed by gender and averaged 132 g/d and 46 g/d, respectively. Under the direct scenario (optimizing *HDP* only without a specific constraint for ruminant meat reduction, and under nutritional and acceptability constraints only), ruminant meat was removed and replaced by poultry: completely in males and almost completely in females (-93%) (Figure 1). This meat substitution contributed to improving the *HDP* between the modeled and observed diets (-2.5 to +2.9 on average for both genders), together with concomitant increases in fruits (+191% to +219% depending on the gender) and vegetables (+128% to +142%), and the considerable replacement of refined grain products with whole grain products (Figure 1). Compared to the increases in these plant-protein sources, the consumption of seafood and dairy products remained relatively stable (+24% to +77%, and +9% to +18%, respectively), but there had been an internal redistribution within seafood products (in favor of oily fish and shellfish/crustaceans). Egg consumption also increased (+336% to +409%).

Gradual optimization scenario

Under the gradual scenario (optimizing both *HDP* and *DD* under all the nutritional and acceptability constraints and the constraint for gradual reduction in ruminant meat), modeled diets could be

identified at each step of ruminant meat reduction in both genders (Figure 2 and Supplemental Tables 5, 6 and 7). Major dietary changes occurred very early (from the first step, to reach diets with full nutrient adequacy), then more gradually during the first half of the transition, before slowing down during the second half, with diets being much similar overall within a 50% to 100% reduction in ruminant meat (Figure 2).

The amount of total meat decreased at the first step (-26% to -34%, depending on gender, at the 10% ruminant meat reduction step compared to the observed diet) and then remained relatively constant throughout, at a relatively high amount (~100g per day). There was an internal redistribution within meats, marked by a strong and early increase in poultry consumption by both males and females (+42 to +50% from the 10% ruminant meat reduction step), and drastic reductions or the removal of pork and other meats as well as processed meats (Supplemental Table 8). Meat intake consisted almost exclusively of poultry in much larger quantities than in the observed diets, as from the 20% ruminant meat reduction step. Regarding internal redistribution within ruminant meats, the consumption of mainly beef and veal was kept and then reduced as from the 10% reduction step, and ruminant offal was kept at a relatively high level compared to its observed consumption by both genders (Figure 2 and Supplemental Table 8).

The most notable improvements in the *HDP* criterion were achieved early in the transition and at low *DD* costs, as two-thirds of the potential *HDP* gain were achieved after only half of the total *DD* (Supplemental Figure 2). From the point where the *HDP/DD* yield was falling sharply, little additional *HDP* gain was achieved by subsequent dietary changes that mainly consisted in a gradual reduction of ruminant meat consumption. The *HDP* criterion finally almost reached its maximum possible value, indicating that all unhealthy foods had been removed and all healthy foods had reached their maximum values defined in the acceptability constraints.

Impact of the beef-milk co-production constraint

Addition of the beef-milk co-production constraint had little influence on the results, regardless of the scenario considered (Supplemental Figures 3, 4 and 5). Indeed, the coproduction constraint was never

active (*i.e.*, had no influence on the results) at any step in the transition among males, but became active in females from the 90% step and finally problematic at the 100% step where the model no longer converged (Supplemental Figures 4 and 5), in particular because the food vectors of calcium intake other than dairy products were no longer sufficient. More specifically, the coproduction constraint became limiting in females for a ruminant meat consumption of 4 g per day or less (data not shown).

Nutritional adequacy and changes in food group contributions to nutrient intakes throughout transition

Sodium, linoleic acid, α -linolenic acid, docosahexaenoic (DHA) and eicosapentaenoic (EPA) acids, and sugar (excluding lactose), which were excessively or insufficiently provided by the observed diets, rose to adequate intakes in all the modeled diets, but they were nevertheless identified as limiting nutrients (*i.e.*, maintaining their adequacy was costly for the objective criteria *HDP* and *DD*) in both genders in all modeled diets (Table 1). In addition, some nutrients with inadequate observed intakes were also identified as being limiting in the modeled diets in both genders but only during the first part of the transition, when ruminant meat intake was only partly reduced: vitamins A and C, iodine, saturated fatty acids, and fiber (Table 1 and Supplemental Figures 6, 7 and 8). In terms of relative importance, sodium was always the most binding nutrient regardless of gender and the degree of ruminant meat reduction, often followed by that of sugar (excluding lactose) (Supplemental Table 9).

By contrast, B vitamins (especially B6 and B12), protein, selenium, bioavailable iron and zinc were never limiting, and their intakes were maintained above reference/target values throughout the transition to ruminant meat-free diets (Supplemental Table 3).

In the observed diet, ruminant meat contributed notably to the intakes of bioavailable iron (20-25%, depending on gender), vitamin B12 (20-25%), bioavailable zinc (19-25%), protein (11-15%), vitamin B6 (8-11%), vitamin A (4-5%), and selenium (2-3%). As consumed in the INCA3 survey, ruminant meat (and particularly ruminant offal) contained higher levels of these nutrients than other types of meat (Supplemental Table 10). Although small in absolute amounts, preserving ruminant offal mitigated the

decrease in the contribution of red meat to adequate levels of vitamins A and B12 (**Figure 3**). Under the ruminant meat-free diets that were obtained at the last step of the transition, animal or plant-based food groups other than ruminant meat (mainly poultry, seafood, dairy products, eggs, fruit and vegetables and whole grain products) contributed to maintaining intakes above current reference/target values for selenium (82-96% higher than its reference value, depending on gender), vitamin B12 (64-67% higher), protein (59-63% higher), bioavailable zinc (43-81% higher), vitamin B6 (26-43% higher), bioavailable iron (13-33% higher) and vitamin A (2-4% higher) (**Figure 3** and **Supplemental Figure 8**). Therefore, during the later steps of the transition marked by a marked reduction in ruminant meat, more than half of bioavailable iron and zinc were supplied by plant-based food groups, although the absorption of non-heme iron and zinc was hampered by the increase in phytate levels (due to the increase in whole grain products). For selenium and vitamins A and B6, gradual increases in plant food groups also helped to maintain adequate intakes until a ruminant meat-free diet was achieved (**Figure 3** and **Supplemental Figure 8**).

Improvement in the environmental footprint of the modeled diets

Compared to observed diets, ruminant meat-free diets at the final transition step would emit fewer GHGe (-29% on average for both genders) and enable less land use (-36%), but would consume more water (+47%) with a slightly higher energy demand (+5%) (**Figure 4**).

Discussion

Because it was modeled in order to obtain the healthiest dietary pattern (using the *HDR* criterion), the direct scenario revealed that ruminant meat could easily be removed from the diet without jeopardizing nutritional adequacy. Under both scenarios, the direct removal or gradual reduction of ruminant meat involved the removal of red meat and its replacement with poultry (up to ~100 g/d) alongside marked increases in fruits, vegetables and whole grain products. Such healthier modeled diets, virtually free of unhealthy foods and almost maximal in terms of healthy foods up to their

acceptability limits, were associated with reductions of about one third in related GHGe (-29%) and land use (-36%) when compared to current diets.

More specifically, when *HDR* was maximized directly without taking account of dietary inertia (direct scenario), in both genders we identified modeled diets containing no ruminant meat that were more nutritionally adequate than the observed diets. The modeled diets were relatively distant from current diets, and poultry was almost the only meat consumed (but three times less than observed levels). This scenario showed that ruminant meat could readily be removed when the diet was optimized based on a health objective only. As the observed diets were typical current Western diets rich in animal products and particularly meat (132 g/d), removing ruminant meat, and red meat more broadly, could have implications in terms of cultural acceptability (Dagevos, 2021; Tyszler et al., 2016). Here, the modeling of healthy dietary patterns by successive steps of a 10% reduction in ruminant meat enabled the analysis of a gradual departure from diets that preserved the best dietary habits in order to depict progressive attitudinal shifting. As an effect of the health criterion, non-ruminant red meat (pork and processed meat) was drastically reduced at a very early stage, and further meat redistribution then consisted in a gradual replacement of the remaining beef and veal with poultry. Within the red meat category, offal was largely maintained (-16% at the final step compared to the observed diet), indicating a nutritional leverage effect of offal, particularly because of its high vitamin A, iron, and zinc contents, as previously shown (Barré et al., 2018). Taken together, we found that limiting nutrients were not directly related to the contribution of red meat, and partial substitution with poultry offered a solution. Indeed, poultry did not fully replace red meat in terms of quantity, and the final diets contained a quarter less meat overall.

Given that the reductions in red and processed meats were driven by the *HDP* criterion, it was expected that the modeled diets would favor poultry, which was in line with the literature which had shown that poultry is a healthier alternative to red and processed meats (Papier et al., 2021; Papp et al., 2021). Notably, during the first step of the gradual scenario, reducing red and processed

meats in favor of poultry resulted in a lower and more adequate intake of saturated fatty acids (SFA) (-17% compared to the observed diet).

Reducing meat consumption and shifting primarily to poultry would be entirely consistent with some diets modeled during studies designed to define diets with concomitant human and environmental health benefits (Walker et al., 2019). In our study, ruminant meat-free modeled diets were associated with a ~30% reduction in GHGe. This was in line with the literature which had shown lower GHGe levels with diets higher in plant-based foods (Chai et al., 2019; Clune et al., 2017; Jarmul et al., 2020), and reported ~35% lower GHGe from ovolactovegetarian diets than most current omnivore diets (Fresán and Sabaté, 2019). Our findings should also be compared with the corpus of diet optimization studies that specifically explored potential GHGe reductions under nutritional constraints (Aleksandrowicz et al., 2016; Auestad and Fulgoni, 2015; Perignon et al., 2017; van Dooren, 2018; Wilson et al., 2019). However, as expected, the literature on modeling reductions in overall meat consumption (not just of a ruminant type) has indicated more marked GHGe effects (Chai et al., 2019; Ferrari et al., 2020; Fresán and Sabaté, 2019; Grasso et al., 2021; Kesse-Guyot et al., 2021; Perignon et al., 2016; Tyszler et al., 2016). Using diet optimization, a French study concluded that moderate GHGe reductions ($\leq 30\%$) were compatible with nutritional adequacy and affordability, but the shift in food groups was limited to those required to meet nutrient reference values whereas in the present study we also included the objective of a higher compliance with health-related dietary patterns (Perignon et al., 2016). A recent optimization study of Dutch dietary patterns showed that modeled diets involving no change in total meat consumption (but with reduced beef consumption offset by increased contributions from both poultry and pork) could be associated with a 50-60% reduction in GHGe (Grasso et al., 2021). Starting from a high level of GHGe with the observed diet, we would have expected a greater reduction with the modeled diets than that found here. There could be several possible reasons for this, one being that we evaluated environmental effects in an impact analysis, unlike the other studies where a reduction in GHGe was a direct goal or constraint of the optimization model. Thus

in our study, the modeled diets used dietary levers on the health dimension, and some other emitting food groups markedly increased, such as poultry (+201% at the 100% step compared to the observed diet), fruits (+205%) and vegetables (+135%).

Finally, all environmental pressures (land use and cumulative energy demand) displayed similar patterns of change during the transition towards ruminant meat reduction, except for water use (Meier and Christen, 2013; Tom et al., 2016). Therefore, increases in some food groups such as fruits and vegetables in the modeled diets may not meet all environmental requirements in a context of rising temperatures and drought, or where changes to agricultural practices are required.

Our study had certain strengths and limitations. In terms of its strengths, our multi-criteria approach to diet optimization considered a broad range of nutrients, including bioavailable iron and zinc, and the relative digestibility of protein. Our results were also relatively expandable to the Western context, as the study was based on observed diets in French adults with similar background intakes – although somewhat higher in meat – and similar reference values when compared to other Western countries (Mariotti et al., 2021). Regarding the limitations, our results were closely dependent on the underlying model assumptions and parameterization (such as the definition of food groups and the acceptability values considered). The sample size was large enough to offer good precision regarding the initial diets but a larger sample size would have been useful to address the variability of dietary patterns in the population and focus on subgroups of populations. The number of food groups also greatly influenced the model by smoothing the nutritional contents of the groups and thus masking any specific features of certain contributors within each group at a more detailed level. This limitation also applied to assessing the environmental impact of the diet; environmental data do not include all the externalities associated with foods such as indicators on biodiversity, and the LCAs were based on generic production methods that did not take account of any diversity of practices, being limited to the French production context.

Conclusions

Taking ruminant meat as a cornerstone, this study has identified a route for diet modification that offers dual benefits regarding health and the environment. Using diet modeling, we have evidenced that ruminant meat could be removed completely to achieve healthy and nutritionally adequate diets. Our main findings are that ruminant meat could be simply replaced by poultry, as could other red meats. Such a reduction in ruminant meat consumption would be accompanied by an in-depth restructuring of the diet towards a healthy dietary pattern that would rapidly be devoid of processed meats and non-ruminant red meat, and a gradual increase in healthy, plant-based foods. This transition would also result in marked reduction (30%) in food-related GHGe, a factor which is often central to the rationale for reducing ruminant production.

Acknowledgments and statement of authors' contributions to the manuscript

This research received no external funding.

The authors are grateful to Vincent Colomb and Mélissa Cornélius (Ademe) for their support in the use of the Agribalyse database.

AD, HF, EK-G, and FM: designed the research; AD, HF: conducted the research; AD, HF, EK-G, and FM analyzed the data; MS, EP, and J-FH provided methodological support; AD drafted the first version of the manuscript, AD, EK-G, HF and FM wrote the manuscript and all authors provided critical comments on the manuscript. AD and HF had primary responsibility for the final content, and all authors read and approved the final manuscript.

FM has received research grants as PhD fellowships under his direction from AgroParisTech and INRAE from Terres Univia (2018-2021, for MS), and Ecotone Foundation, under the aegis of the Fondation de France (2021-2024). The other authors report no conflicts of interest.

References

- AGRIBALYSE 3.0, the French agricultural and food LCI database, methodology for food products (collective expertise report), 2020. . ADEME, Paris, France.
- 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. <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, 1023. <https://doi.org/10.3390/nu9091023>
- Auestad, N., Fulgoni, V.L., 2015. What current literature tells us about sustainable diets: emerging research linking dietary patterns, environmental sustainability, and economics. *Advances in Nutrition* 6, 19–36. <https://doi.org/10.3945/an.114.005694>
- 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. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191767>
- Campbell, B., Beare, D., Bennett, E., Hall-Spencer, J., Ingram, J., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J., Shindell, D., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society* 22. <https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408>
- CFS Voluntary Guidelines on Food Systems and Nutrition, 2021. . Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italy.
- Chai, B.C., van der Voort, J.R., Grofelnik, K., Eliasdottir, H.G., Klöss, I., Perez-Cueto, F.J.A., 2019. Which Diet Has the Least Environmental Impact on Our Planet? A Systematic Review of Vegan, Vegetarian and Omnivorous Diets. *Sustainability* 11, 4110. <https://doi.org/10.3390/su11154110>

- Clark, M.A., Springmann, M., Hill, J., Tilman, D., 2019. Multiple health and environmental impacts of foods. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 23357–23362. <https://doi.org/10.1073/pnas.1906908116>
- Clune, S., Crossin, E., Verghese, K., 2017. Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories. *Journal of Cleaner Production* 140, 766–783. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.082>
- Cocking, C., Walton, J., Kehoe, L., Cashman, K., 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 Reviews* 33, 181–189. <https://doi.org/10.1017/S0954422419000295>
- Colomb, V., Amar, S.A., Mens, C.B., Gac, A., Gaillard, G., Koch, P., Mousset, J., Salou, T., Tailleur, A., Werf, H.M.G. van der, 2015. AGRIBALYSE®, the French LCI Database for agricultural products: high quality data for producers and environmental labelling. *OCL* 22, D104. <https://doi.org/10.1051/ocl/20140047>
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F.N., Leip, A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food* 2, 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
- Dagevos, H., 2021. Finding flexitarians: Current studies on meat eaters and meat reducers. *Trends in Food Science & Technology* 114, 530–539. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.06.021>
- 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>
- Dubuisson, C., Dufour, A., Carrillo, S., Drouillet-Pinard, P., Havard, S., Volatier, J.-L., 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 Nutrition* 22, 584–600. <https://doi.org/10.1017/S1368980018002896>
- Dussiot, A., Fouillet, H., Wang, J., Salomé, M., Huneau, J.-F., Kesse-Guyot, E., Mariotti, F., 2021. Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and

zinc—a diet optimization study in French adults. *The American Journal of Clinical Nutrition*.
<https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab373>

Ferrari, M., Benvenuti, L., Rossi, L., De Santis, A., Sette, S., Martone, D., Piccinelli, R., Le Donne, C., Leclercq, C., Turrini, A., 2020. Could Dietary Goals and Climate Change Mitigation Be Achieved Through Optimized Diet? The Experience of Modeling the National Food Consumption Data in Italy. *Frontiers in Nutrition* 7.

Fresán, U., Sabaté, J., 2019. Vegetarian Diets: Planetary Health and Its Alignment with Human Health. *Advances in Nutrition* 10, S380–S388. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz019>

Grasso, A.C., Olthof, M.R., van Dooren, C., Broekema, R., Visser, M., Brouwer, I.A., 2021. Protein for a Healthy Future: How to Increase Protein Intake in an Environmentally Sustainable Way in Older Adults in the Netherlands. *The Journal of Nutrition* 151, 109–119. <https://doi.org/10.1093/jn/nxaa322>

Jarmul, S., Dangour, A.D., Green, R., Liew, Z., Haines, A., Scheelbeek, P.F., 2020. Climate change mitigation through dietary change: a systematic review of empirical and modelling studies on the environmental footprints and health effects of 'sustainable diets'. *Environmental Research Letters* 15, 123014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc2f7>

Jarmul, S., Liew, Z., Haines, A., Scheelbeek, P., 2019. Climate change mitigation in food systems: the environmental and health impacts of shifting towards sustainable diets, a systematic review protocol. <https://doi.org/10.12688/wellcomeopenres.15618.1>

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>

Koch, P., Salou, T., 2014. AGRIBALYSE®: Rapport Méthodologique – Version 1.1. ADEME, FRANCE.

- Kramer, G.F., Tyszler, M., Veer, P.V., Blonk, H., 2017. Decreasing the overall environmental impact of the Dutch diet: how to find healthy and sustainable diets with limited changes. *Public Health Nutrition* 20, 1699–1709. <https://doi.org/10.1017/S1368980017000349>
- Kramer, G.F.H., Martinez, E.V., Espinoza-Orias, N.D., Cooper, K.A., Tyszler, M., Blonk, H., 2018. Comparing the Performance of Bread and Breakfast Cereals, Dairy, and Meat in Nutritionally Balanced and Sustainable Diets. *Frontiers in Nutrition* 5, 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00051>
- Lea, E.J., Crawford, D., Worsley, A., 2006. Consumers' readiness to eat a plant-based diet. *European Journal of Clinical Nutrition* 60, 342–351. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1602320>
- Macdiarmid, J.I., Kyle, J., Horgan, G.W., Loe, J., Fyfe, C., Johnstone, A., McNeill, G., 2012. Sustainable diets for the future: Can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet? *The American Journal of Clinical Nutrition* 96, 632–639. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.038729>
- Mariotti, F., Havard, S., Morise, A., Nadaud, P., Sirot, V., Wetzler, S., Margaritis, I., 2021. Perspective: Modeling Healthy Eating Patterns for Food-Based Dietary Guidelines-Scientific Concepts, Methodological Processes, Limitations, and Lessons. *Advances in Nutrition* 12, 590–599. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa176>
- Meier, T., Christen, O., 2013. Environmental Impacts of Dietary Recommendations and Dietary Styles: Germany As an Example. *Environ. Sci. Technol.* 47, 877–888. <https://doi.org/10.1021/es302152v>
- Mertens, E., Kaptijn, G., Kuijsten, A., van Zanten, H., Geleijnse, J.M., van 't Veer, P., 2019. SHARP-Indicators Database towards a public database for environmental sustainability. *Data in Brief* 27, 104617. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104617>
- Nelson, M.E., Hamm, M.W., Hu, F.B., Abrams, S.A., Griffin, T.S., 2016. Alignment of Healthy Dietary Patterns and Environmental Sustainability: A Systematic Review¹². *Advances in Nutrition* 7, 1005–1025. <https://doi.org/10.3945/an.116.012567>
- Opinion of the French Food Safety Agency on the benefits/risks of fish consumption (Collective expertise report), 2008. . French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Paris, France.

- Papier, K., Knuppel, A., Syam, N., Jebb, S.A., Key, T.J., 2021. Meat consumption and risk of ischemic heart disease: A systematic review and meta-analysis. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 0, 1–12. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1949575>
- Papp, R.-E., Hasenegger, V., Ekmekcioglu, C., Schwingshackl, L., 2021. Association of poultry consumption with cardiovascular diseases and all-cause mortality: a systematic review and dose response meta-analysis of prospective cohort studies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 0, 1–22. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1975092>
- Perignon, M., Masset, G., Ferrari, G., Barré, T., Vieux, F., Maillot, M., Amiot, M.-J., Darmon, N., 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 Nutrition* 19, 2662–2674. <https://doi.org/10.1017/S1368980016000653>
- Perignon, M., Vieux, F., Soler, L.-G., Masset, G., Darmon, N., 2017. Improving diet sustainability through evolution of food choices: review of epidemiological studies on the environmental impact of diets. *Nutrition Reviews* 75, 2–17. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuw043>
- Poore, J., Nemecek, T., 2018. Reducing food’s environmental impacts through producers and consumers. *Science* 360, 987–992. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- Study of the relationship between food group consumption and risk of chronic non-communicable diseases (Collective expertise report), 2016. . French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Paris, France.
- Temme, E.H., Toxopeus, I.B., Kramer, G.F., Brosens, M.C., Drijvers, J.M., Tyszler, M., Ocké, M.C., 2015. Greenhouse gas emission of diets in the Netherlands and associations with food, energy and macronutrient intakes. *Public Health Nutrition* 18, 2433–2445. <https://doi.org/10.1017/S1368980014002821>
- The ANSES-CIQUAL food composition table [WWW Document], 2016. URL <https://ciqual.anses.fr/#> (accessed 6.22.21).

The nutritional guideline update for vitamins and minerals (Collective expertise report), 2021. . French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Paris, France.

Tilman, D., Clark, M., 2014. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature* 515, 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature13959>

Tom, M.S., Fischbeck, P.S., Hendrickson, C.T., 2016. Energy use, blue water footprint, and greenhouse gas emissions for current food consumption patterns and dietary recommendations in the US. *Environ Syst Decis* 36, 92–103. <https://doi.org/10.1007/s10669-015-9577-y>

Tyszler, M., Kramer, G., Blonk, H., 2016. Just eating healthier is not enough: studying the environmental impact of different diet scenarios for Dutch women (31–50 years old) by linear programming. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21, 701–709. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0981-9>

van Dooren, 2018. A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally. *Frontiers in Nutrition* 5, 48. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00048>

Walker, C., Gibney, E.R., Mathers, J.C., Hellweg, S., 2019. Comparing environmental and personal health impacts of individual food choices. *Science of The Total Environment* 685, 609–620. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.404>

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, S389–S403. <https://doi.org/10.1093/advances/nmz037>

TABLE 1. Daily intakes of limiting nutrients in observed and modeled diets optimized to be healthier (direct scenario, “Direct”) or to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Males															
Nutrient ²	Unit	Observed diet	Modeled diet											Lower bound	Upper bound
			Direct scenario	Gradual scenario ³											
				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Vitamin A	µg·d ⁻¹	804	750 ⁴	750	750	752	781	795	789	777	766	759	779	750	-
Vitamin C	mg·d ⁻¹	98 ⁵	159	110	124	143	159	168	168	169	169	168	168	110	-
Calcium	mg·d ⁻¹	1065	950	1007	1017	1024	1030	1030	1020	1018	1012	1007	1001	950	2500
Iodine	µg·d ⁻¹	175	164	150	150	150	150	150	150	150	152	154	154	150	600
Sodium	mg·d ⁻¹	3938	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	1500	2300
Water	g·d ⁻¹	2780	2684	2634	2690	2753	2801	2790	2500	2511	2520	2507	2500	2500	-
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	14%	10%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	10%	10%	10%	-	12%
Atherogenic fatty acids ⁶	%EI·d ⁻¹	8%	6%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	6%	-	8%
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	-
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	-
EPA+DHA ⁷	g·d ⁻¹	0.33	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.65	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
Sugar (excluding lactose)	g·d ⁻¹	102	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100
Fiber	g·d ⁻¹	23	47	30	32	34	36	37	37	38	39	39	38	30	-

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² Only limiting nutrients (*i.e.*, nutrients whose constraint was active in at least one step of the transition in males or females, thus constraining the identified dietary solution) are represented here. See Supplemental Table 3 for the other nutrients considered in the model.

³ In each x% modeled diet of the gradual scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value.

⁴ In the modeled diets, the nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are shown in white on a black background.

⁵ In the observed diet, the nutrient intakes not complying with nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are shown in bold.

⁶ Atherogenic fatty acids, lauric and myristic and palmitic acids.

⁷ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

TABLE 1 cont. Daily intakes of limiting nutrients in observed and modeled diets optimized to be healthier (direct scenario, “Direct”) or to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Females															
Nutrient ²	Unit	Observed diet	Modeled diet											Lower bound	Upper bound
			Direct scenario	Gradual scenario ³											
				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Vitamin A	µg·d ⁻¹	608 ⁴	650 ⁵	650	679	718	764	788	791	791	774	682	663	650	-
Vitamin C	mg·d ⁻¹	84	123	110	110	124	142	137	145	144	144	142	141	110	-
Calcium	mg·d ⁻¹	892	950	980	986	1002	1009	971	1000	996	993	987	981.8	950	2500
Iodine	µg·d ⁻¹	145	150	150	150	150	150	150	150	152	155	155	153	150	600
Sodium	mg·d ⁻¹	3100	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	1500	2300
Water	g·d ⁻¹	2422	2923	2446	2470	2511	2544	2206	2214	2218	2216	2205	2198		
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	15%	8%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	-	12%
Atherogenic fatty acids ⁶	%EI·d ⁻¹	9%	5%	8%	8%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	-	8%
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	-
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	-
EPA+DHA ⁷	g·d ⁻¹	0.22	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
Sugar (excluding lactose)	g·d ⁻¹	80	100	100	92	100	100	100	100	98	98	99	99	-	100
Fiber	g·d ⁻¹	19	41	30	31	33	35	34	35	36	36	36	36	30	-

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² Only limiting nutrients (*i.e.*, nutrients whose constraint was active in at least one step of the transition in males or females, thus constraining the identified dietary solution) are represented here. See Supplemental Table 3 for the other nutrients considered in the model.

³ In each x% modeled diet of the gradual scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value.

⁴ In the observed diet, the nutrient intakes not complying with nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are shown in bold.

⁵ In the modeled diets, the nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are shown in white on a black background.

⁶ Atherogenic fatty acids, lauric and myristic and palmitic acids.

⁷ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

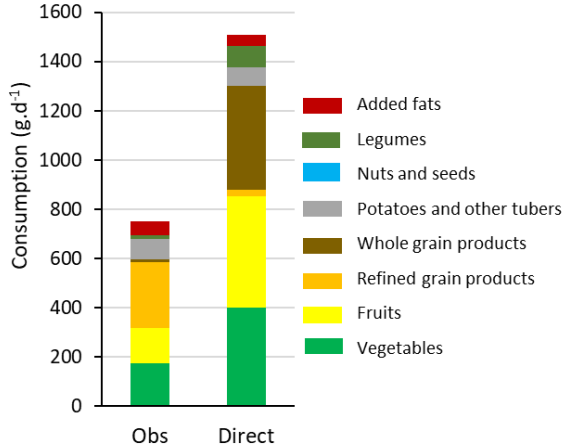
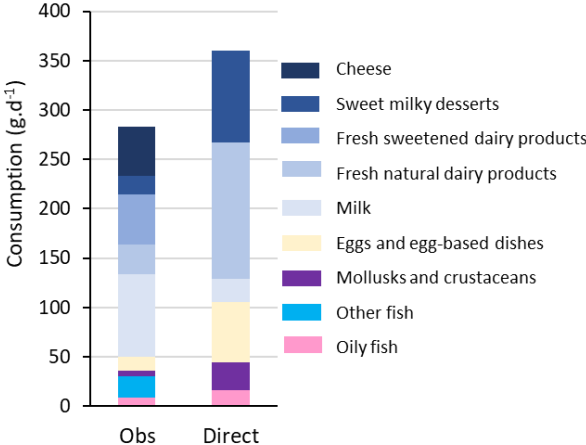
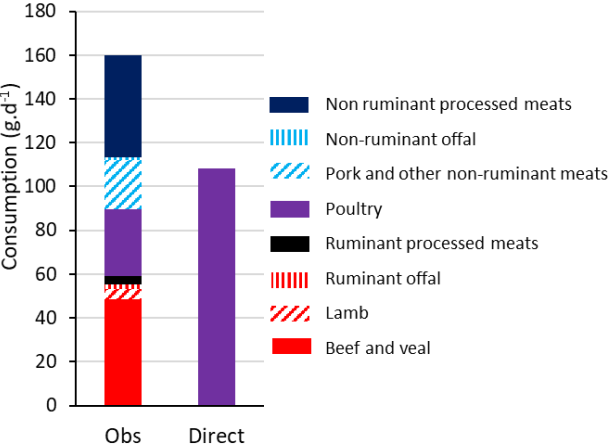
Dietary means to reduce and remove ruminant meat in healthy and nutrient-adequate diets and final alignment with lower environmental impacts

Dussiot *et al.*

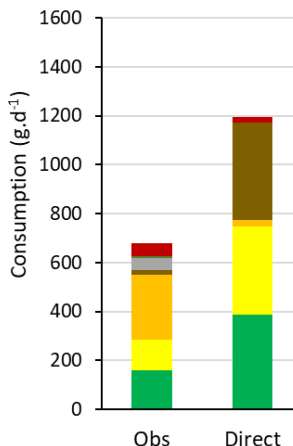
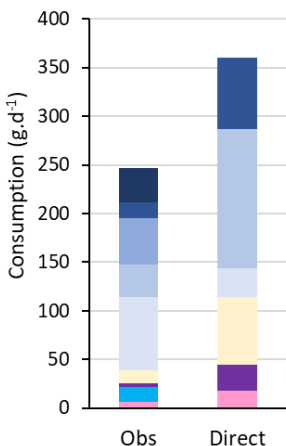
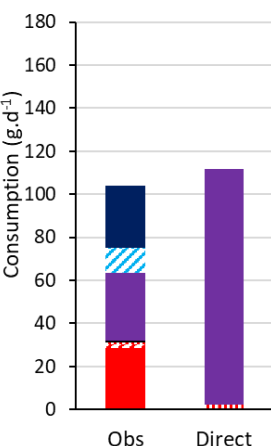
FIGURES

FIGURE 1. Average daily consumption of plant- or animal-based food groups in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier (direct scenario, “Direct”) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

A. Males



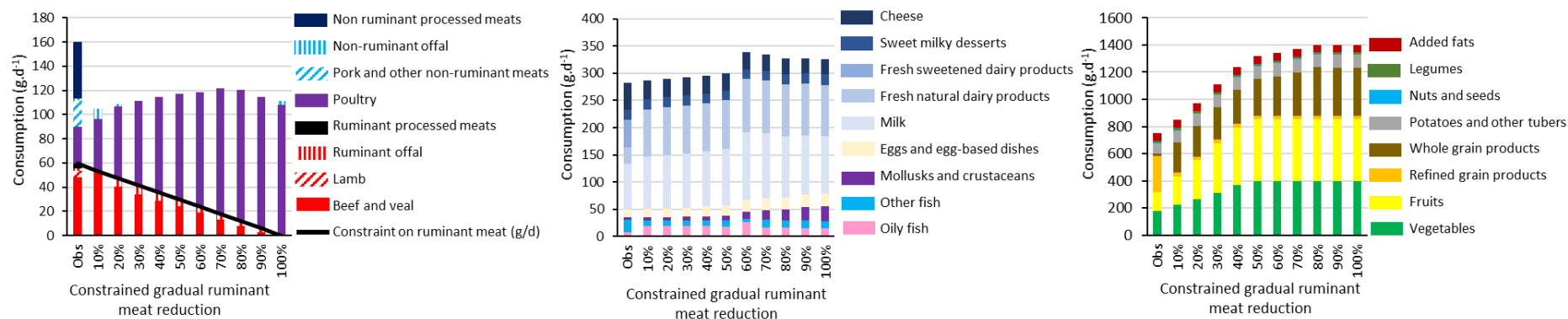
B. Females



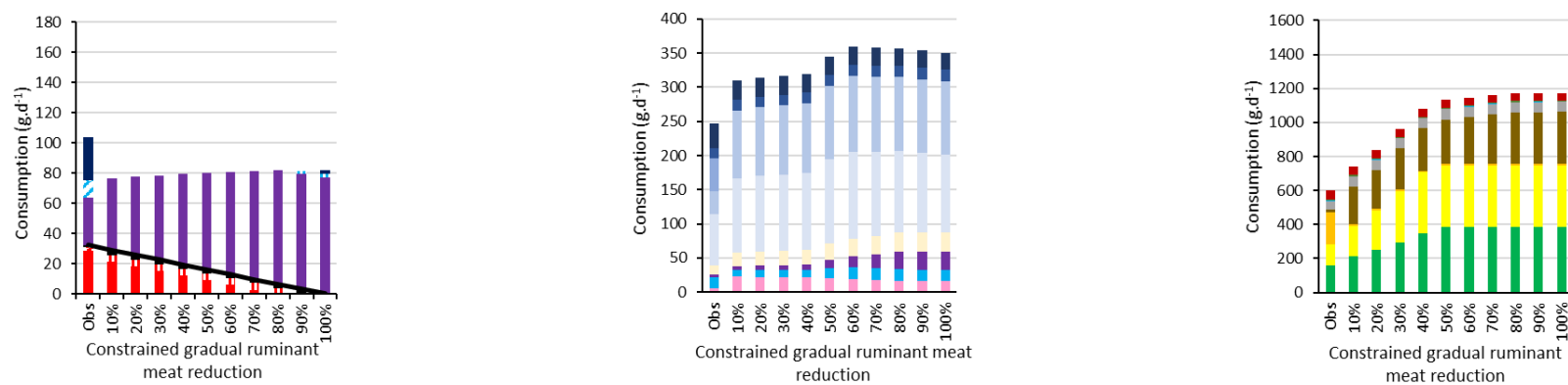
For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 3.

FIGURE 2. Average daily consumption of plant- or animal- based food groups in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

A. Males



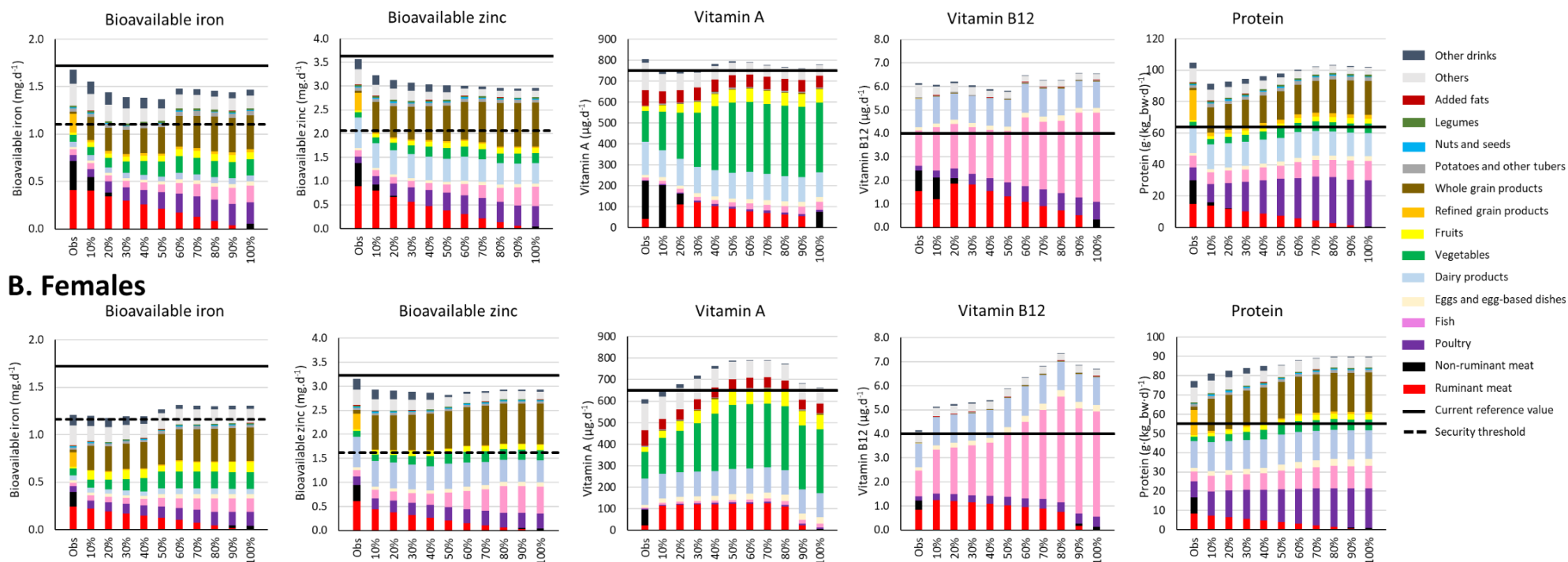
B. Females



Dietary inertia was modeled using the Diet Departure criterion. In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value. For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 3.

FIGURE 3. Contribution of food groups to bioavailable iron and zinc, vitamins A and B12, and protein in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

A. Males



Dietary inertia was modeled using the Diet Departure criterion. In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value. For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 3.

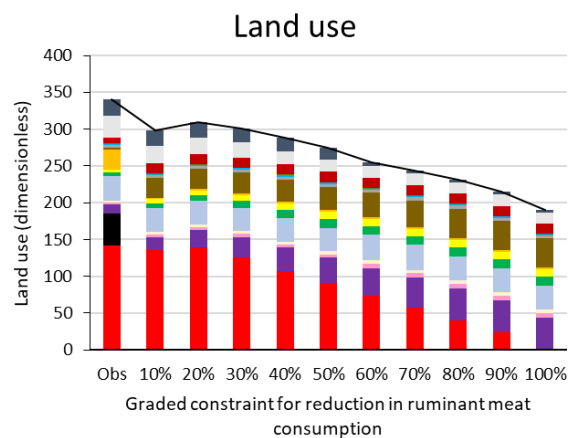
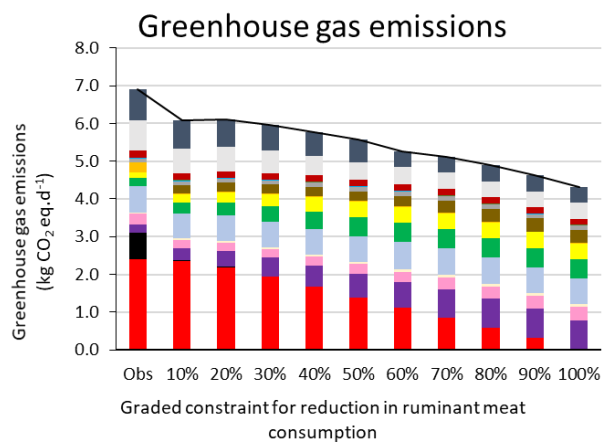
Iron and zinc are shown as bioavailable amounts that take account of their absorption, and likewise protein intake accounts for the lower digestibility of plant proteins (see Methods for detailed information). For each nutrient, the current reference values and security thresholds (for bioavailable iron and zinc) are

represented by solid and dashed lines, respectively (see Methods for detailed information on how "flexibility" was allowed on bioavailable iron and zinc using goal variables, and Table 1 and Supplemental Table 3 for detailed values on the current references and security thresholds).

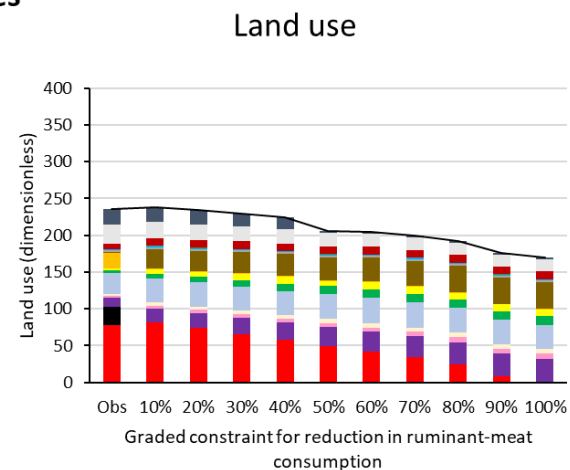
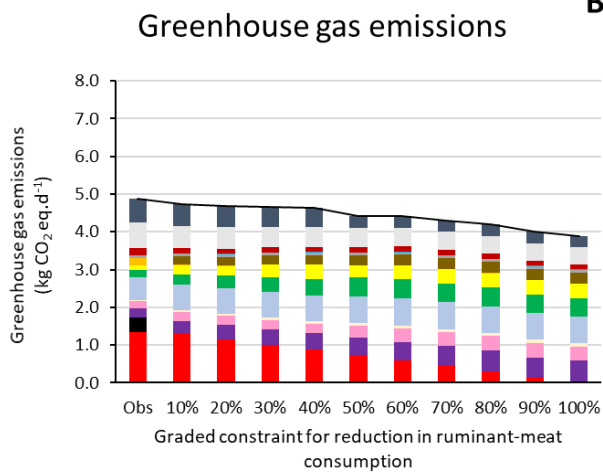
The Figures show nutrients that are largely provided by meat in the observed diets.

FIGURE 4. Contribution of food groups to different Agribalyse indicators (greenhouse gas emissions, land use, water deprivation, and cumulative energy demand) in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

A. Males

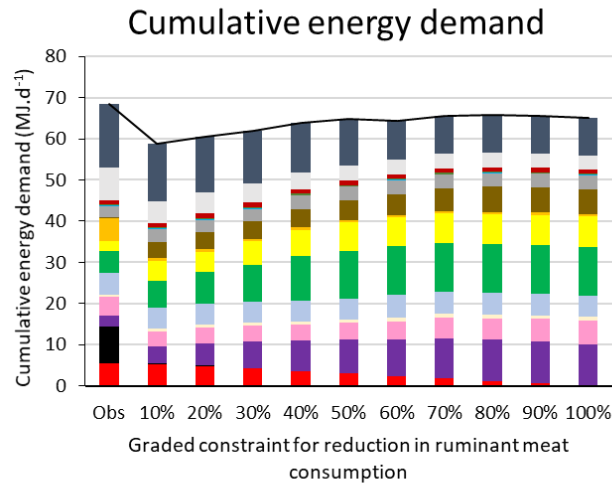
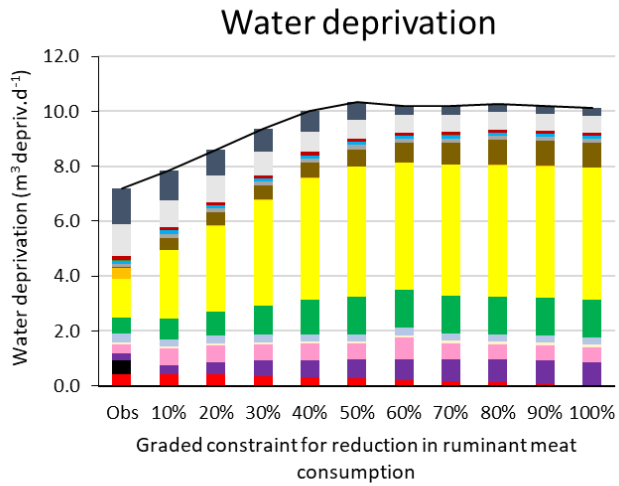


B. Females



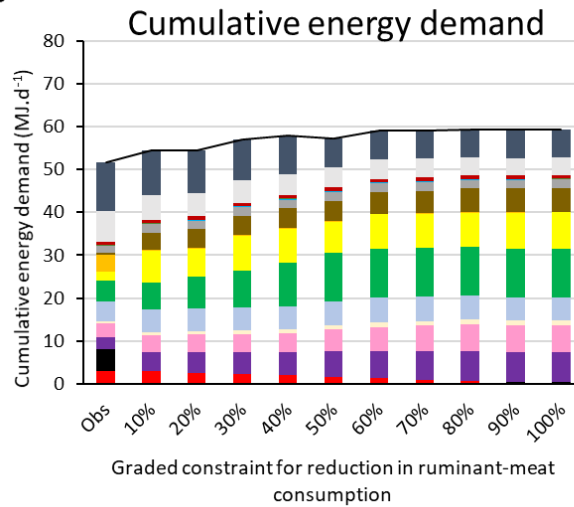
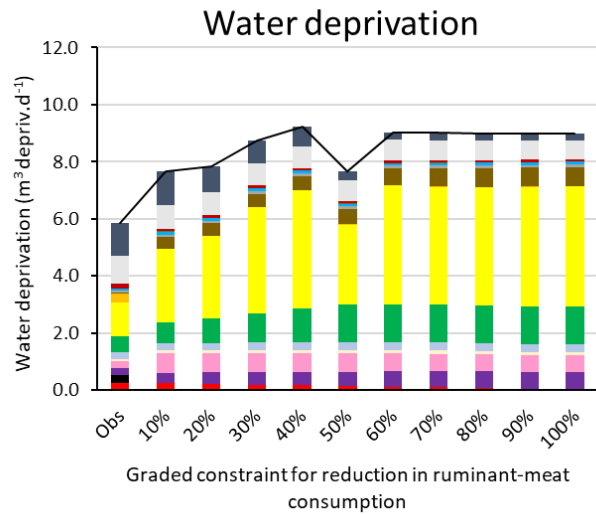
In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value. For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 2. For each indicator, the total is represented by a line. We used the French LCA Database for food items as consumed (AGRIBALYSE®). Greenhouse gas emissions are linked to the rise in average global temperatures and expressed in carbon dioxide equivalent (kg CO₂ eq). Land use refers to the use and transformation of land and is dimensionless.

A. Males



- Other drinks
- Others
- Added fats
- Legumes
- Nuts and seeds
- Potatoes and other tubers
- Whole grain products
- Refined grain products
- Fruits
- Vegetables
- Dairy products
- Eggs and egg-based dishes
- Fish
- Poultry
- Non-ruminant meat
- Ruminant meat
- Total

B. Females



Water deprivation is related to the local scarcity of water and expressed in cubic meters of water (m³ depriv).

Cumulative energy demand is the use of non-renewable fossils resources such as coal, oil, and gas and expressed in MJ.

Dietary means to reduce and remove ruminant meat in healthy and nutrient-adequate diets and final alignment with lower environmental impacts

Dussiot *et al.*

ONLINE SUPPLEMENTARY MATERIAL

SUPPLEMENTAL TABLE 1. Lifestyle and sociodemographic characteristics of the sample of adults ($n = 1125$) extracted from the French national INCA3 study, 2014-2015

	Males ($n = 564$)	Females ($n = 561$)
Age, %		
< 25y	9%	8%
25-35y	16%	25%
35-50y	38%	52%
50-65y	37%	15%
Level of education, %		
< High-school diploma	34%	23%
High-school diploma	21%	21%
Post-secondary education	44%	56%
Body Mass Index, %		
< 18.5 kg.m ⁻²	2%	4%
18.5-24.99 kg.m ⁻²	49%	59%
25-29.99 kg.m ⁻²	38%	24%
> 30 kg.m ⁻²	11%	12%
Alcohol consumption, %		
Non-drinker	30%	54%
Moderate drinker ¹	70%	46%
Heavy drinker ²	-	-

¹ <20g/d for females and <30 g/d for males

² >20g/d for females and >30 g/d for males (Dubuisson et al., 2019; "Anses," 2017)

SUPPLEMENTAL TABLE 2. Summary of food groups formed for food categorization and different Agribalyse indicators (greenhouse gas emissions, land use, water deprivation and cumulative energy demand)

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion of food group within the category	Main types of foods (Proportion of foods within the group)	Greenhouse gas emissions (kg CO ₂ eq.d ⁻¹)	Land use (dimension -less)	Water use (m ³ depriv.d ⁻¹)	Energy demand (MJ.d ⁻¹)
Fruits and vegetables (244)	Vegetables (149)	61%	Raw vegetables (~40%) Cooked vegetables (~60%)	1.28	29.58	3.44	29.30
	Fresh fruit (50)	20%	Raw fruit (100%)	0.90	22.06	10.41	15.21
	Dried fruit (9)	4%	Dried fruits (70%) Chestnuts (30%)	2.50	65.82	24.36	104.94
	Processed fruit: compotes and cooked fruit (13)	5%	Compote (40%) Fruit in syrup (40%)	0.72	7.38	3.33	22.22
	Nuts and seeds (23)	9%	Nuts (~50%) Seeds (~40%)	5.02	507.19	34.95	54.32
Starches (171)	Bread and refined bakery products (36)	21%	Breads (~50%) Rusks (~20%)	0.81	88.32	0.97	20.50
	Whole-meal and semi-refined bread and bakery products (15)	9%	Breads (~50%) Rusks (~30%)	1.04	133.63	0.90	20.04
	Other refined starches (13)	8%	Rice (~30%) Pasta (~20%)	1.38	138.28	2.46	23.32
	Other complete and semi-complete starches (11)	6%	Wheat (50%) Quinoa (20%)	0.94	106.85	2.99	16.77
	Potatoes and other tubers (20)	12%	Potatoes (~50%) Other tubers (~20%)	1.17	44.56	1.59	33.86
Legumes (16)	Legumes (16)	100%	Dried beans (~50%) Lentils (15%)	0.73	63.66	1.07	20.81

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion of food group within the category	Main types of foods (Proportion of foods within the group)	Greenhouse			Energy demand (MJ.d ⁻¹)
				gas emissions (kg CO ₂ eq.d ⁻¹)	Land use (dimensionless)	Water use (m ³ depriv.d ⁻¹)	
Meats, Processed meats, Fish products, Eggs (315)	Poultry (24)	8%	Chicken (~ 30%)	7.23	401.43	7.85	92.53
			Duck (~ 20%)				
	Beef and veal (40)	13%	Beef (~ 65%)	44.04	2526.48	7.57	99.31
			Veal (~ 35%)				
	Pork and other non-ruminant	8%	Pork (~ 60%)	14.47	912.21	9.76	171.03
	Lamb (13)	4%	Lamb (~ 100%)	58.14	5139.21	14.18	114.21
	Non-ruminant offal (6)	2%	Chicken (~ 50%)	1.61	74.95	1.41	32.89
	Ruminant offal (13)	4%	Beef and veal (~ 85%)	30.71	1808.49	5.99	83.31
	Ruminant processed meat (69)	22%	Sausages, "andouilles" (~ 35%) "Rillettes", "pâtés", "terrines", "foie gras" (~ 35%)	8.30	490.86	6.15	107.06
	Non-ruminant processed meat (2)	1%	Merguez (50%), Grisons cured beef (50%)	47.52	3460.97	9.94	97.20
	Oily fish (32)	10%	Salmon (~ 30%)	4.97	132.88	28.05	93.15
			Mackerel (~ 20%)				
	Other fish (55)	17%	Tuna (~ 15%)	9.49	54.48	4.78	148.57
			Trout (~ 10%)				
Mollusks and crustaceans (21)	7%	Mollusks excluding cephalopods (40%) Crustaceans (~ 30%)	5.66	142.94	2.05	84.47	
Eggs and egg-based dishes (14)	4%	Whole eggs (~ 65%) Egg yolks (~ 20%)	2.85	215.26	4.59	40.10	

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion of food group within the category	Main types of foods within the group (Proportion of foods within the group)	Greenhouse			
				gas emissions (kg CO ₂ eq.d ⁻¹)	Land use (dimension-less)	Water use (m ³ depriv.d ⁻¹)	Energy demand (MJ.d ⁻¹)
Milk and dairy products (192)	Milk (15)	8%	Semi-skimmed cow's milk (40%) Whole cow's milk (25%)	1.60	81.69	0.46	11.35
	Fresh natural dairy products (18)	9%	Yoghurts, fermented milks and dairy Cottage cheese, "Faisselles", Petit	2.81	135.04	1.14	25.94
	Fresh sweetened dairy products (39)	20%	Yoghurts, fermented milks and dairy Cottage cheese, "Faisselles", Petit	2.08	98.83	1.57	25.98
	Sweet milky desserts (22)	11%	Cream desserts (~60%) Other sweet desserts (~25%)	3.80	98.64	2.15	32.76
	Cheese (98)	51%	-	5.95	309.36	2.25	32.81
Added fats (98)	Animal fats and assimilated fats (4)	4%	Lard, bacon, duck or goose fat	1.46	68.90	1.01	23.80
	Butter and low-fat butter (11)	11%	Butter (55%)	15.16	471.86	9.72	55.53
			Low-fat butter (45%)				
	Vegetable fats rich in α -linoleic acid (4)	4%	Vegetable oils (100%)	1.95	418.18	1.30	22.48
Vegetable fats low in α -linoleic acid (24)	24%	Vegetable oils (33%) Vegetable fats (margarine type)	2.28	196.86	6.14	25.92	

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion of food group within the category	Main types of foods (Proportion of foods within the group)	Greenhouse gas emissions (kg CO ₂ eq.d ⁻¹)	Land use (dimensionless)	Water use (m ³ depriv.d ⁻¹)	Energy demand (MJ.d ⁻¹)
Others (447)	Starch-based products, sweet/fat processed (61)	36%	Breakfast cereals (~ 50%) Cookies (~ 20%)	3.74	163.03	3.53	32.07
	Salt/fat processed starch products (15)	9%	Savory cookies (~ 50%) Crisps: 4 foods (~ 20%)	2.05	180.01	1.03	32.05
	Sauces and fresh creams (55)	56%	Hot sauces (80%) Cold sauces	4.47	227.70	4.06	37.00
	Sweet products or sweet and fatty products (198)	100%	Pastries (~ 15%) Cookies (~ 10%)	4.69	134.41	8.01	35.44
	Salt (6)	100%	-	0.63	3.38	0.76	12.73
	Condiments (13)	100%	Olives or similar (~ 50%) Vinegar products (~ 20%)	0.34	22.29	2.22	6.81
	Aromatic herbs, spices except salt (38)	100%	Aromatic herbs (~ 65%) Spices (35%)	0.81	80.07	2.82	15.90
	Soups (30)	79%	Vegetable soups (with or without cheese) (85%) Soups with eggs, poultry or fish (15%)	1.03	46.39	1.07	25.85
	Bouillons (8)	21%	Broths with meat (75%) Vegetable broths only (25%)	0.11	2.09	0.30	13.46
	Substitutes for animal products (9)	100%	Soy products (~ 90%) Almond drink (~ 10%)	0.66	28.38	2.66	14.29
Other foods (14)	100%	Fish eggs (~ 40%) Vinegars (25%)	1.34	79.31	1.65	27.58	

Food category (Number of food items per category)	Food group (Number of food items per group)	Proportion of food group within the category	Main types of foods (Proportion of foods within the group)	Greenhouse gas emissions (kg CO ₂ eq.d ⁻¹)	Land use (dimensionless)	Water use (m ³ depriv.d ⁻¹)	Energy demand (MJ.d ⁻¹)
Other drinks (181)	Drinking water (44)	100%	-	0.25	1.48	0.16	5.70
	Sweetened soda-type drinks (45)	61%	-	0.47	8.85	1.65	10.90
	Fruit juices (29)	39%	-	0.38	11.84	3.58	7.80
	Hot drinks (22)	100%	Coffee and related products (~ 60%) Tea and herbal teas (~ 30%)	0.47	32.60	1.00	5.64
	Alcoholic drinks (41)	100%	-	1.11	16.32	0.53	22.48

The French LCA Database for food items as consumed AGRIBALYSE® was used here (ADEME, 2020).

Greenhouse gas emissions are linked to the increase in the average global temperatures and expressed in carbon dioxide equivalent (kg CO₂ eq).

Land use refers to the use and transformation of land and is dimensionless.

Water deprivation is related to the local scarcity of water and is expressed in cubic meters of water (m³ depriv).

Cumulative energy demand is use of non-renewable fossils resources such as coal, oil, and gas and expressed in MJ.

SUPPLEMENTAL TABLE 3. Daily intakes of nutrients under the observed and modeled diets optimized to be healthier (direct scenario, “Direct”) or to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reductions in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Males															
Nutrient	Unit	Observed diet	Modeled diet											Lower bound	Upper bound
			Direct scenario	Gradual scenario ²											
				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Retinol	µg·d ⁻¹	573	332	506	464	418	393	376	371	359	348	342	362	-	3000
Vitamin A	µg·d ⁻¹	805	750 ³	750	750	752	781	795	789	777	766	759	779	750	-
Thiamin	µg·(kcal·d) ⁻¹	0.54	0.54	0.50	0.51	0.53	0.55	0.56	0.56	0.56	0.57	0.56	0.56	0.42	-
Riboflavin	mg·d ⁻¹	2.2	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	1.6	-
Niacin ⁴	µg·d ⁻¹	20	10	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	6.7	-
Pantothenic acid	mg·d ⁻¹	6.9	7.8	6.7	6.8	6.9	7.1	7.2	7.1	7.2	7.2	7.2	7.2	3.8	-
Vitamin B6	mg·d ⁻¹	2.1	2.5	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.4	2.4	1.7	25
Folate	µg·d ⁻¹	347	545	378	395	418	443	460	463	471	479	477	477	330	-
Vitamin B12	µg·d ⁻¹	6.2	5.7	6.1	6.2	6.0	5.9	5.8	6.5	6.3	6.3	6.6	6.5	4.0	-
Vitamin C	mg·d ⁻¹	98 ⁵	159	110	124	143	159	168	168	169	169	168	168	110	-
Vitamin D ⁶	µg·d ⁻¹	3.5	3.6	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.8	3.4	3.3	3.3	3.2	-	100
Vitamin E	mg·d ⁻¹	13	18	15	15	16	16	17	17	17	17	17	17	5.3	-
Vitamin K1	µg·d ⁻¹	118	240	146	163	183	205	218	221	219	219	219	219	39	-
Calcium	mg·d ⁻¹	1065	950	1007	1017	1024	1030	1030	1020	1018	1012	1007	1001	950	2500
Copper	mg·d ⁻¹	2.1	2.8	2.0	2.2	2.3	2.3	2.4	2.3	2.4	2.4	2.5	2.4	2.0	5
Bioavailable Iron	mg·d ⁻¹	1.68	1.69	1.55	1.44	1.39	1.38	1.37	1.48	1.47	1.46	1.44	1.47	1.10	-
Iodine	µg·d ⁻¹	175	164	150	150	150	150	150	150	150	152	154	154	150	600
Magnesium	mg·d ⁻¹	409	542	463	471	483	495	499	453	469	484	484	484	254	-

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled diet of the gradual scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value.

³ In the modeled diets, the nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are shown in white on a black background.

⁴ 1 mg niacin equivalent (NE) is equal to 1mg niacin or 60 mg tryptophan.

⁵ In the observed diet, nutrient intakes not complying with nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are shown in bold.

⁶ One exception was vitamin D, for which we did not set any lower constraint; based on previous works, the reference value is known to be much too high to permit a solution from diet optimization (Dussiot et al., 2021; Mariotti et al., 2021).

SUPPLEMENTAL TABLE 3 cont. Daily intakes of nutrients under the observed and modeled diets optimized to be healthier (direct scenario, “Direct”) or to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Males															
Nutrient	Unit	Observed diet	Modeled diet											Lower bound	Upper bound
			Direct scenario	Gradual scenario ²											
				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Manganese	mg·d ⁻¹	3.6	6.6	4.5	4.6	4.8	5.0	5.1	5.0	5.2	5.5	5.5	5.5	2.0	-
Phosphorus	mg·d ⁻¹	1483	1751	1424	1459	1490	1528	1562	1620	1653	1679	1664	1654	550	-
Potassium	mg·d ⁻¹	3736	4513	3963	4054	4215	4396	4466	4196	4236	4247	4233	4220	3500	-
Selenium	µg·d ⁻¹	146	141	123	127	130	133	135	129	134	136	137	137	70	300
Sodium	mg·d ⁻¹	3938 ³	2300 ⁴	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	1500	2300
Bioavailable zinc	mg·d ⁻¹	3.57	2.90	3.23	3.13	3.08	3.04	3.01	3.01	2.99	2.96	2.95	2.96	2.06	25
Water	g·d ⁻¹	2780	2684	2634	2690	2753	2801	2790	2500	2511	2520	2507	2500	2500	-
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	14%	10%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	10%	10%	10%	-	12%
Atherogenic fatty acids ⁵	%EI·d ⁻¹	8%	6%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	6%	-	8%
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	-
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	-
Linoleic acid / α-linolenic acid ratio	-	8	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	-	5
EPA+DHA ⁶	g·d ⁻¹	0.33	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.65	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
Sugar excluding lactose	g·d ⁻¹	102	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	-	100
Protein ⁷	g·d ⁻¹	103	109	91	93	94	96	98	100	102	103	102	102	64	179
Fiber	g·d ⁻¹	23	47	30	32	34	36	37	37	38	39	39	38	30	-

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled diet of the gradual scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value.

³ In the observed diet, nutrient intakes not complying with nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are shown in bold.

⁴ In the modeled diets, nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are shown in white on a black background.

⁵ Atherogenic fatty acids, lauric and myristic and palmitic acids.

⁶ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

⁷ Intakes (mg/d) were converted to mg/kg body weight/day for a mean body weight of 77.4 kg for males. To account for the slightly lower average digestibility of plant protein, protein intake from plants was reduced by 5% when calculating total protein intake, as previously described in the Methods section (L122-L123).

SUPPLEMENTAL TABLE 3 cont. Daily intakes of nutrients under the observed and modeled diets optimized to be healthier (direct scenario, “Direct”) or to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Females															
Nutrient	Unit	Observed diet	Modeled diet											Lower bound	Upper bound
			Direct scenario	Gradual scenario ²											
				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Retinol	µg·d ⁻¹	395	268	386	389	389	387	393	389	390	375	285	267	-	3000
Vitamin A	µg·d ⁻¹	608 ³	650 ⁴	650	679	718	764	788	791	791	774	682	663	650	-
Thiamin	µg·(kcal·d) ⁻¹	0.56	0.54	0.55	0.55	0.55	0.57	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.42	-
Riboflavin	mg·d ⁻¹	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.7	1.8	1.8	1.8	1.7	1.7	1.6	-
Niacin ⁵	µg·d ⁻¹	20	20	20	20	20	20	10	20	20	20	20	20	6.7	-
Pantothenic acid	mg·d ⁻¹	5.3	7.0	6.1	6.2	6.4	6.5	6.1	6.4	6.5	6.5	6.4	6.4	3.2	-
Vitamin B6	mg·d ⁻¹	1.5	2.0	1.8	1.8	1.9	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.6	25
Folate	µg·d ⁻¹	280	410	358	363	385	410	403	426	429	430	423	421	330	-
Vitamin B12	µg·d ⁻¹	4.1	6.5	5.1	5.2	5.3	5.4	5.9	6.4	6.8	7.3	6.8	6.7	4.0	-
Vitamin C	mg·d ⁻¹	84	123	110	110	124	142	137	145	144	144	142	141	110	-
Vitamin D ⁶	µg·d ⁻¹	2.9	3.6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.6	3.6	3.5	3.4	3.4	3.4	-	100
Vitamin E	mg·d ⁻¹	11	14	13	13	14	14	15	15	15	15	15	15	4.4	-
Vitamin K1	µg·d ⁻¹	111	232	146	161	181	203	252	217	217	217	217	217	35	-
Calcium	mg·d ⁻¹	892	950	980	986	1002	1009	971	1000	996	993	987	982	950	2500
Copper	mg·d ⁻¹	1.6	2.6	2.0	2.1	2.2	2.2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.2	2.2	0.89	5
Bioavailable Iron	mg·d ⁻¹	1.21	1.51	1.2	1.18	1.19	1.2	1.27	1.31	1.3	1.3	1.3	1.31	1.16	-
Iodine	µg·d ⁻¹	145	150	150	150	150	150	150	150	152	155	155	153	150	600
Magnesium	mg·d ⁻¹	330	483	435	441	455	461	401	426	435	442	442	442	195	-

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled diet of the gradual scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value.

³ In the observed diet, nutrient intakes not complying with nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are shown in bold.

⁴ In the modeled diets, nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are shown in white on a black background.

⁵ 1 mg niacin equivalent (NE) is equal to 1mg niacin or 60 mg tryptophan.

⁶ One exception was vitamin D, for which we did not set any lower constraint; based on previous works, the reference value is known to be much too high to permit a solution from diet optimization (Dussiot et al., 2021; Mariotti et al., 2021).

SUPPLEMENTAL TABLE 3 cont. Daily intakes of nutrients under the observed and modeled diets optimized to be healthier (direct scenario, “Direct”) or to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Females															
Nutrient	Unit	Observed diet	Modeled diet											Lower bound	Upper bound
			Direct scenario	Gradual scenario ²											
				10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%		
Manganese	mg·d ⁻¹	3.1	5.8	4.4	4.5	4.7	4.8	4.4	4.7	4.8	4.9	4.9	4.9	1.5	-
Phosphorus	mg·d ⁻¹	1128	1 558	1321	1340	1378	1411	1435	1490	1506	1514	1508	1510	550	-
Potassium	mg·d ⁻¹	2906 ³	3 825	3781	3743	3939	4038	3601	3834	3819	3813	3815	3811	3500	-
Selenium	µg·d ⁻¹	120	135	116	119	121	124	135	124	126	128	128	127	70	300
Sodium	mg·d ⁻¹	3100	2300 ⁴	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	1500	2300
Bioavailable zinc	mg·d ⁻¹	3.15	2.98	2.93	2.91	2.88	2.86	2.81	2.88	2.90	2.93	2.93	2.92	1.61	25
Water	g·d ⁻¹	2422	2 923	2446	2470	2511	2544	2206	2214	2218	2216	2205	2198	2000	-
Saturated fatty acids	%EI·d ⁻¹	15%	8%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	-	12%
Atherogenic fatty acids ⁵	%EI·d ⁻¹	9%	5%	8%	8%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	7%	-	8%
Linoleic acid	%EI·d ⁻¹	3%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	4%	-
α-linolenic acid	%EI·d ⁻¹	0%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	1%	-
Linoleic acid / α-linolenic acid ratio	-	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	-	5
EPA+DHA ⁶	g·d ⁻¹	0.22	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	-
Sugar excluding lactose	g·d ⁻¹	80	100	100	92	100	100	100	100	98	98	99	99	-	100
Protein ⁷	g·d ⁻¹	76	99	81	82	84	85	86	88	89	90	90	90	55	152
Fiber	g·d ⁻¹	19	41	30	31	33	35	34	35	36	36	36	36	30	-

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled diet of the gradual scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value.

³ In the observed diet, nutrient intakes not complying with nutritional constraints (*i.e.*, not between the lower and upper bounds) are shown in bold.

⁴ In the modeled diets, nutrient intakes that were limiting (*i.e.*, equal to their lower or upper bounds) are shown in white on a black background.

⁵ Atherogenic fatty acids, lauric and myristic and palmitic acids.

⁶ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

⁷ Intakes (mg/d) were converted to mg/kg body weight/day for a mean body weight of 77.4 kg for males. To account for the slightly lower average digestibility of plant protein, protein intake from plants was reduced by 5% when calculating total protein intake, as previously described in the Methods section (L122-L123).

SUPPLEMENTAL TABLE 4. Summary of constraints and criteria for each food group in the diet optimization model for males and females

Food group	Optimization Objective (HDP criterion)	Males				Females			
		Observed consumption (g/d)	Constraint			Observed consumption (g/d)	Constraint		
			Lower limit ¹ (g/d)	Upper limit (g/d)	Joint upper limit (g/d)		Lower limit (g/d)	Upper limit (g/d)	Joint upper limit (g/d)
Vegetables	Maximization	176	20	400	-	160	18	387	-
Fresh fruits	Maximization	128	0	-	454 ²	107	0	-	359
Dried fruits		1	0	-		1	0	-	
Processed fruit: compotes and cooked fruit		13	0	-		15	0	-	
Nuts, seeds and oleaginous fruit	Maximization	3	0	20	-	2	0	14	-
Bread and refined bakery products		168	27	-	-	115	10	-	-
Complete and semi-complete bread and bakery products		11	0	-	-	15	0	-	-
Other refined starches	Maximization	98	0	-	-	72	0	-	-
Other complete and semi-complete starches		4	0	-	-	4	0	-	-
Potatoes and other tubers		79	0	264	-	49	0	196	-
Legumes	Minimization	13	0	86	-	6	0	43	-
Poultry		30	0	108	-	31	0	109	-
Beef and veal		48	0	-	71	28	0	-	71
Pork and other non-ruminant meats	22	0	-	11		0	-		
Lamb	5	0	-	2		0	-		
Non-ruminant offal	Minimization	1	0	36	25	0	0	36	25
Ruminant offal		2	0	-		1	0	-	
Non-ruminant processed meats		46	0	-		29	0	-	
Ruminant processed meats	4	0	-	1	0	-			

Oily fish ³	8	0	26	-	6	0	26	-
Other fish ³	22	0	110	-	15	0	80	-
Mollusks and crustaceans	5	0	28	-	4	0	26	-
Eggs and egg-based dishes	14	0	61	-	14	0	70	-
Milk	84	0	343	-	75	0	322	-
Fresh natural dairy products	31	0	138	-	33	0	143	-
Fresh sweetened dairy products	50	0	179	-	48	0	168	-
Sweet milky desserts	19	0	93	-	16	0	73	-
Cheeses	49	0	131	-	36	0	94	-
Animal fats and assimilated fats	1	0	0	-	0	0	0	-
Butter and light butter	10	0	33	-	10	0	30	-
Vegetable fats rich in α -linoleic acid	0	0	-	32	0	0	-	30
Vegetable fats rich in α -linoleic acid	12	0	-	-	10	0	-	-
Sauces and fresh creams	35	0	118	-	32	0	100	-
Sweet products or sweet and fatty products	103	9	251	-	83	9	215	-
Drinking water	1007	182	-	-	929	75	-	-
Sweetened soda-type drinks	141	0	-	263	140	0	-	263
Fruit juices	80	0	-	-	67	0	-	-
Hot drinks	494	0	494	-	507	0	507	-
Salt	1	0	4	-	1	0	4	-
Condiments	4	0	29	-	3	0	21	-
Aromatic herbs, Spices except salt	2	0	7	-	2	0	6	-
Soups	71	0	434	-	75	0	381	-
Bouillons	5	0	21	-	4	0	25	-
Substitutes for animal products	3	0	29	-	5	0	29	-
Other foods	4	4	4	-	2	2	2	-
Alcoholic drinks	216	0	216	-	59	0	59	-
Bread and bakery products	178	-	354	-	130	-	316	-
Other starches	102	-	276	-	76	-	188	-
Liquids	2098	1061	3777	-	1857	738	3087	-

¹ Lower and upper limits correspond to the 5th or 95th percentiles of consumption for all food groups except those with an upper limit set as a dietary constraint (red meat, processed meat and soft drinks).

² The most substitutable food groups were grouped together to define their lower and upper bounds as the 5th or 95th percentiles of their total consumption.

³ In order to consider the French dietary recommendations for fish consumption, two additional constraints were added to limit total fish consumption to 39 g/d and oily fish consumption to 26 g/d (*Anses, 2008*).

SUPPLEMENTAL TABLE 5. Absolute changes to daily food group consumptions in observed and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females) ²

	Males										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ³									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Diet composition, g/d											
Vegetables	176	223	263	309	366	400	400	400	400	400	400
Fruits	142	212	289	369	424	453	453	453	453	453	453
Nuts and seeds	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Refined grain products	266	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Whole grain products	14	220	227	238	252	269	290	319	355	354	353
Potatoes and other tubers	79	89	89	90	94	95	98	97	96	96	96
Legumes	13	15	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Poultry	30	43	59	70	79	88	95	104	108	108	108
Beef and veal	48	53	40	34	29	24	19	13	8	2	0
Pork and other non-ruminant meats	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lamb	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-ruminant offal	1	8	2	0	0	0	0	0	0	0	3
Ruminant offal	2	0	7	8	7	6	5	5	4	3	0
Non-ruminant processed meats	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ruminant processed meats	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oily fishes	8	20	19	19	19	19	26	16	16	15	15
Other fishes	22	10	10	10	10	11	6	15	14	14	13
Mollusks and crustaceans	5	5	6	7	8	9	14	17	19	25	28
Eggs and egg-based dishes	14	16	17	17	18	19	22	22	22	23	23
Milk	84	96	97	99	102	104	124	119	113	109	105
Fresh natural dairy products	31	87	88	88	88	89	98	97	96	95	94
Fresh sweetened dairy products	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Sweet milky desserts	19	19	20	19	18	18	18	19	19	19	20
Cheeses	49	34	34	33	32	32	31	30	29	28	27
Added fats	23	31	31	32	33	33	33	33	33	33	33
Others	253	158	155	140	122	112	109	107	104	103	101
Other drinks	1938	1777	1709	1644	1577	1490	1144	1138	1131	1126	1124

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² Data are averages.

³ In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value. For clarity, the 48 modeled food groups are not shown here. The remaining food groups were grouped as "others" (11 groups) and "other drinks" (5 groups). Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2.

SUPPLEMENTAL TABLE 5 cont. Absolute changes to daily food group consumptions in observed and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females) ²

	Females										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ³									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Diet composition, g/d											
Vegetables	176	223	263	309	366	400	400	400	400	400	400
Fruits	142	212	289	369	424	453	453	453	453	453	453
Nuts and seeds	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Refined grain products	266	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Whole grain products	14	220	227	238	252	269	290	319	355	354	353
Potatoes and other tubers	79	89	89	90	94	95	98	97	96	96	96
Legumes	13	15	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Poultry	30	43	59	70	79	88	95	104	108	108	108
Beef and veal	48	53	40	34	29	24	19	13	8	2	0
Pork and other non-ruminant meats	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lamb	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-ruminant offal	1	8	2	0	0	0	0	0	0	0	3
Ruminant offal	2	0	7	8	7	6	5	5	4	3	0
Non-ruminant processed meats	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ruminant processed meats	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oily fishes	8	20	19	19	19	19	26	16	16	15	15
Other fishes	22	10	10	10	10	11	6	15	14	14	13
Mollusks and crustaceans	5	5	6	7	8	9	14	17	19	25	28
Eggs and egg-based dishes	14	16	17	17	18	19	22	22	22	23	23
Milk	84	96	97	99	102	104	124	119	113	109	105

Fresh natural dairy products	31	87	88	88	88	89	98	97	96	95	94
Fresh sweetened dairy products	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sweet milky desserts	19	19	20	19	18	18	18	19	19	19	20
Cheeses	49	34	34	33	32	32	31	30	29	28	27
Added fats	23	31	31	32	33	33	33	33	33	33	33
Others	253	158	155	140	122	112	109	107	104	103	101
Other drinks	1938	1777	1709	1644	1577	1490	1144	1138	1131	1126	1124

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² Data are averages.

³ In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value. For clarity, the 48 modeled food groups are not shown here. The remaining food groups were grouped as "others" (11 groups) and "other drinks" (5 groups). Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2.

SUPPLEMENTAL TABLE 6. Relative changes to daily food group consumptions in observed and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

	Males										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Differences to observed diets, % ³											
Δ Vegetables	-	27%	49%	76%	108%	128%	128%	128%	128%	128%	128%
Δ Fruits	-	49%	103%	160%	198%	219%	219%	219%	219%	219%	219%
Δ Nuts and seeds	-	9%	6%	3%	2%	0%	-4%	-6%	-8%	-10%	-11%
Δ Refined grain products	-	-90%	-90%	-90%	-90%	-90%	-90%	-90%	-90%	-90%	-90%
Δ Whole grain products	-	1422	1470	1546	1644	1759	1903	2104	2354	2344	2340
Δ Potatoes and other tubers	-	13%	13%	14%	18%	20%	24%	23%	21%	21%	21%
Δ Legumes	-	9%	8%	7%	7%	6%	5%	4%	3%	2%	2%
Δ Poultry	-	42%	94%	129%	159%	188%	212%	241%	256%	256%	256%
Δ Beef and veal	-	10%	-17%	-30%	-40%	-51%	-61%	-73%	-84%	-95%	-100%
Δ Pork and other non-ruminant meats	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Δ Lamb	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Δ Non-ruminant offal	-	539%	61%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	135%
Δ Ruminant offal	-	-100%	201%	231%	183%	147%	111%	92%	69%	47%	-100%
Δ Non-ruminant processed meats	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Δ Ruminant processed meats	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Δ Oily fishes	-	135%	131%	128%	125%	120%	209%	95%	90%	81%	78%
Δ Other fishes	-	-56%	-55%	-54%	-53%	-51%	-72%	-33%	-38%	-38%	-40%
Δ Mollusks and crustaceans	-	1%	15%	33%	53%	82%	175%	237%	292%	414%	459%
Δ Eggs and egg-based dishes	-	14%	18%	23%	28%	33%	54%	57%	58%	61%	65%
Δ Milk	-	14%	16%	18%	21%	25%	48%	42%	35%	29%	26%
Δ Fresh natural dairy products	-	184%	188%	189%	188%	190%	220%	218%	214%	211%	209%

Δ Fresh sweetened dairy products	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Δ Sweet milky desserts	-	-1%	2%	-1%	-6%	-9%	-6%	-4%	-2%	0%	2%
Δ Cheeses	-	-30%	-31%	-33%	-34%	-36%	-37%	-39%	-42%	-43%	-45%
Δ Added fats	-	35%	36%	37%	41%	43%	42%	42%	41%	41%	41%
Δ Others	-	-38%	-39%	-45%	-52%	-56%	-57%	-58%	-59%	-60%	-60%
Δ Other drinks	-	-8%	-12%	-15%	-19%	-23%	-41%	-41%	-42%	-42%	-42%

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value.

³ The percentage increase or decrease at each step is relative to the observed diet. For clarity, the 48 modeled food groups are not shown here. The remaining food groups were grouped as "others" (11 groups) and "other drinks" (5 groups). Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2.

SUPPLEMENTAL TABLE 6 cont. Relative changes to daily food group consumptions in observed and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

	Females									
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²								
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
Differences to observed diets, % ³										
Δ Vegetables	-	35%	57%	83%	117%	142%	142%	142%	142%	142%
Δ Fruits	-	43%	87%	147%	191%	191%	191%	191%	191%	191%
Δ Nuts and seeds	-	31%	29%	27%	25%	24%	22%	20%	18%	16%
Δ Refined grain products	-	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%	-95%
Δ Whole grain products	-	1040%	1094%	1140%	1188%	1258%	1331%	1424%	1471%	1480%
Δ Potatoes and other tubers	-	17%	19%	19%	19%	21%	21%	20%	19%	18%
Δ Legumes	-	23%	23%	22%	22%	22%	21%	21%	20%	19%
Δ Poultry	-	50%	64%	77%	90%	103%	115%	128%	139%	142%
Δ Beef and veal	-	-25%	-36%	-47%	-58%	-69%	-79%	-91%	-100%	-100%
Δ Pork and other non-ruminant meats	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Δ Lamb	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Δ Non-ruminant offal	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	263%
Δ Ruminant offal	-	376%	402%	413%	417%	424%	423%	435%	376%	-9%
Δ Non-ruminant processed meats	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-92%
Δ Ruminant processed meats	-	243%	221%	201%	183%	168%	154%	142%	130%	119%
Δ Oily fishes	-	272%	267%	262%	256%	230%	206%	189%	167%	169%
Δ Other fishes	-	-38%	-34%	-33%	-32%	-1%	15%	13%	13%	8%
Δ Mollusks and crustaceans	-	54%	78%	104%	139%	223%	329%	450%	606%	606%
Δ Eggs and egg-based dishes	-	43%	48%	53%	58%	77%	91%	94%	97%	102%
Δ Milk	-	45%	47%	48%	49%	63%	69%	64%	58%	54%
Δ Fresh natural dairy products	-	202%	205%	207%	210%	227%	236%	233%	230%	228%

Δ Fresh sweetened dairy products	-	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Δ Sweet milky desserts	-	-5%	-3%	-2%	0%	3%	5%	6%	7%	8%	9%
Δ Cheeses	-	-21%	-22%	-23%	-24%	-25%	-26%	-28%	-29%	-30%	-31%
Δ Added fats	-	16%	15%	15%	15%	16%	16%	17%	17%	17%	17%
Δ Others	-	-19%	-23%	-28%	-32%	-34%	-37%	-40%	-42%	-43%	-45%
Δ Other drinks	-	-5%	-9%	-13%	-17%	-42%	-42%	-42%	-43%	-43%	-43%

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value.

³ The percentage increase or decrease at each step is relative to the observed diet. For clarity, the 48 modeled food groups are not shown here. The remaining food groups were grouped as "others" (11 groups) and "other drinks" (5 groups). Detailed food categories are presented in Supplemental Table 2.

SUPPLEMENTAL TABLE 7. Absolute daily food group consumptions in observed and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Diet composition, g/d	Males										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Vegetables	176	223	263	309	366	400	400	400	400	400	400
Fresh fruits	128	194	283	369	424	453	441	450	449	448	447
Dried fruits	1	18	6	0	0	0	0	3	4	5	6
Processed fruits: compotes and cooked fruits	13	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0
Nuts, seeds and oleaginous fruits	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Bread and refined bakery products	168	27	27	27	27	27	27	27	27	27	27
Complete and semi-complete bread and bakery products	11	104	101	99	95	92	84	82	79	77	77
Other refined starches	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Other complete and semi-complete starches	4	116	126	139	157	177	206	237	276	276	276
Potatoes and other tubers	79	89	89	90	94	95	98	97	96	96	96
Legumes	13	15	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Poultry	30	43	59	70	79	88	95	104	108	108	108
Beef and veal	48	53	40	34	29	24	19	13	8	2	0
Pork and other non-ruminant meats	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lamb	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-ruminant offal	1	8	2	0	0	0	0	0	0	0	3
Ruminant offal	2	0	7	8	7	6	5	5	4	3	0
Non-ruminant processed meats	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ruminant processed meats	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oily fishes	8	20	19	19	19	19	26	16	16	15	15

Diet composition, g/d	Males										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Other fishes	22	10	10	10	10	11	6	15	14	14	13
Mollusks and crustaceans	5	5	6	7	8	9	14	17	19	25	28
Eggs and egg-based dishes	14	16	17	17	18	19	22	22	22	23	23
Milk	84	96	97	99	102	104	124	119	113	109	105
Fresh natural dairy products	31	87	88	88	88	89	98	97	96	95	94
Fresh sweetened dairy products	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sweet milky desserts	19	19	20	19	18	18	18	19	19	19	20
Cheeses	49	34	34	33	32	32	31	30	29	28	27
Animal fats and assimilated fats	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Butters and light butters	10	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid	0	22	22	22	23	24	24	24	24	24	24
Vegetable fats low in alpha-linoleic acid	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Starch-based products, sweet/fat processed	22	17	16	15	13	12	12	11	11	10	10
Salt/fat processed starch products	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Sauces and fresh creams	35	30	28	27	25	24	22	21	20	19	19
Sweet products or Sweet and fatty products	103	97	96	85	71	64	62	62	61	60	60
Salt	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Condiments	4	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
Aromatic herbs, Spices except salt	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Soups	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bouillons	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Substitutes of animal products	3	4	4	4	3	3	4	4	4	4	4
Other foods	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Drinking waters	1007	981	977	974	969	964	962	958	953	949	948
Sweetened soda type drinks	141	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fruit juices	80	86	52	36	28	23	21	19	17	16	14
Hot drinks	494	494	464	443	402	342	0	0	0	0	0
Alcoholic drinks	216	216	216	191	179	161	161	161	161	161	161

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value.

SUPPLEMENTAL TABLE 7 cont. Absolute daily food group consumptions in observed and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Diet composition, g/d	Females										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Vegetables	160	215	251	292	347	387	387	387	387	387	387
Fresh fruits	107	125	196	265	331	202	329	332	331	328	326
Dried fruits	1	52	35	40	29	7	30	27	28	32	33
Processed fruits: compotes and cooked fruits	15	0	0	0	0	150	0	0	0	0	0
Nuts, seeds and oleaginous fruits	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Bread and refined bakery products	115	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Complete and semi-complete bread and bakery products	15	122	124	124	122	120	117	116	115	116	119
Other refined starches	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Other complete and semi-complete starches	4	98	106	115	126	142	159	178	188	188	188
Potatoes and other tubers	49	58	59	59	59	60	60	59	59	58	58
Legumes	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Poultry	31	47	52	56	60	64	68	72	75	76	77
Beef and veal	28	21	18	15	12	9	6	3	0	0	0
Pork and other non-ruminant meats	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lamb	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Non-ruminant offal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Ruminant offal	1	4	4	4	4	4	4	4	4	1	0
Non-ruminant processed meats	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Ruminant processed meats	1	4	4	3	3	3	3	3	3	3	0
Oily fishes	6	22	22	22	21	20	18	17	16	16	16

Diet composition, g/d	Females										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Other fishes	15	10	10	10	10	15	18	17	17	17	16
Mollusks and crustaceans	4	6	7	8	9	12	16	21	26	26	26
Eggs and egg-based dishes	14	20	20	21	22	24	26	27	27	28	28
Milk	75	109	111	111	112	123	127	123	119	116	114
Fresh natural dairy products	33	99	100	101	102	108	111	110	109	108	107
Fresh sweetened dairy products	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sweet milky desserts	16	15	15	16	16	16	17	17	17	17	17
Cheeses	36	28	28	27	27	27	26	26	25	25	25
Animal fats and assimilated fats	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Butters and light butters	10	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6
Vegetable fats rich in alpha-linoleic acid	0	17	17	17	17	17	17	18	18	18	18
Vegetable fats low in alpha-linoleic acid	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Starch-based products, sweet/fat processed	19	18	17	17	16	16	15	15	14	14	14
Salt/fat processed starch products	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1
Sauces and fresh creams	32	27	26	24	23	22	20	20	19	18	18
Sweet products or Sweet and fatty products	83	69	69	68	67	67	66	65	64	63	62
Salt	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Condiments	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Aromatic herbs, Spices except salt	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Soups	75	57	49	41	35	32	28	26	24	22	21
Bouillons	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Substitutes of animal products	5	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5
Other foods	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Drinking waters	929	914	912	910	908	905	902	901	899	897	896
Sweetened soda type drinks	140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fruit juices	67	141	67	46	36	30	26	23	20	18	17
Hot drinks	507	507	507	469	406	0	0	0	0	0	0
Alcoholic drinks	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59

SUPPLEMENTAL TABLE 8. Relative changes to total and detailed daily meat consumption by type (non-ruminant processed meats, non-ruminant offal, pork and other non-ruminant meats, poultry, ruminant processed meats, ruminant offal, lamb, beef and veal) in observed and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

	Males										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Max. allowed meat consumption, g/d	-	53	47	41	36	30	24	18	12	6	0
Modeled meat consumption, g/d	59	53	48	42	36	30	24	18	12	6	0
Differences to observed diets, % ³											
Meat consumption	-	-10%	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%	-90%	-100%
Poultry	-	42%	94%	129%	159%	188%	212%	241%	256%	256%	256%
Beef and veal	-	10%	-17%	-30%	-40%	-51%	-61%	-73%	-84%	-95%	-100%
Pork and other meats	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pork and other non-ruminant meats	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lamb	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Offal	-	128%	151%	112%	82%	58%	36%	23%	9%	-5%	-16%
Non-ruminant offal	-	539%	61%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	135%
Ruminant offal	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Processed meat	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Non-ruminant processed meats	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ruminant processed meats	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value.

³ The percentage increase or decrease at each step is relative to the observed diet.

SUPPLEMENTAL TABLE 8 cont. Relative changes to total and detailed daily meat consumption by type (non-ruminant processed meats, non-ruminant offal, pork and other non-ruminant meats, poultry, ruminant processed meats, ruminant offal, lamb, beef and veal) in observed and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

	Females										
	Observed diet	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
		10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Max. allowed meat consumption, g/d	-	29	26	23	20	16	13	10	7	3	0
Modeled meat consumption, g/d	33	29	26	23	20	16	13	10	7	3	0
Differences to observed diets, % ³											
meat consumption	-	-10%	-20%	-30%	-40%	-50%	-60%	-70%	-80%	-90%	-100%
Poultry	-	50%	64%	77%	90%	103%	115%	128%	139%	142%	146%
Beef and veal	-	-25%	-36%	-47%	-58%	-69%	-79%	-91%	-100%	-100%	-100%
Pork and other meats	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pork and other non-ruminant meats	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Lamb	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Offal	-	201%	218%	225%	227%	232%	231%	239%	201%	91%	49%
Non-ruminant Offal	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	263%	306%
Ruminant offal	-	-87%	-88%	-88%	-89%	-90%	-90%	-91%	-91%	-92%	-92%
Processed meat	-	-87%	-88%	-88%	-89%	-90%	-90%	-91%	-91%	-92%	-92%
Non-ruminant processed meats Grisons	-	-100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-92%
Ruminant processed meats	-	243%	221%	201%	183%	168%	154%	142%	130%	119%	-100%

SUPPLEMENTAL TABLE 9. Standardized dual values showing the relative influences of the limiting constraints in modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Dual values of nutrient constraints ³	Males									
	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Vitamin A	1.92	0.20	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Vitamin C	0.41	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Iodine	2.19	0.21	0.22	0.26	0.34	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Sodium	-7.36 ⁴	-1.38	-1.30	-1.74	-1.65	-1.42	-1.42	-1.68	-1.39	-1.20
Water	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	0.02
Saturated fatty	-2.57	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
α -linolenic acid	4.09	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
EPA+DHA ⁵	[0.001-0.01]	0.02	[0.001-0.01]	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Sugar excluding	[0.001-0.01]	-0.03	-1.04	-1.89	-1.22	-0.05	-0.05	-0.04	-0.05	-0.05
Fiber	1.11	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value.

³ Standardized dual values representing the potential effect on the objective function of a 100% relaxation of the limiting bound of the constraint considered, in order to classify the nutritional constraints from the most to the least limiting (*i.e.*, active). Limiting constraints have a positive (negative) value if the lower (upper) bound is binding. Only nutrients with a limiting constraint (*i.e.* a non-null dual value) are presented here. Dual values are indicated as [0.001-0.01] when values are between 10⁻³ and 10⁻².

⁴ For each step, the most limiting constraint (*i.e.*, with the highest absolute value) is shown in bold.

⁵ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

SUPPLEMENTAL TABLE 9 cont. Standardized dual values showing the relative influences of the limiting constraints in modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia ¹ during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males and females (INCA3 survey, *n*=564 males and *n*=561 females)

Dual values of nutrient constraints ³	Females									
	Modeled diet with gradual meat reduction (%) ²									
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
Vitamin A	1.96	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Vitamin C	0.76	0.28	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Iodine	6.73	0.17	0.14	0.20	0.90	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Sodium	-7.43 ⁴	-1.18	-1.33	-1.48	-1.59	-1.21	-1.21	-1.25	-0.90	-0.80
Water	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Saturated fatty acids	-4.03	-0.15	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
α-linolenic acid	3.94	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.07
EPA+DHA ⁵	[0.001-0.01]	0.03	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03	0.02	0.02
Sugar excluding lactose	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]
Fiber	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]	[0.001-0.01]

¹ Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion.

² In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value.

³ Standardized dual values representing the potential effect on the objective function of a 100% relaxation of the limiting bound of the constraint considered, in order to classify the nutritional constraints from the most to the least limiting (*i.e.*, active). Limiting constraints have a positive (negative) value if the lower (upper) bound is binding. Only nutrients with a limiting constraint (*i.e.* a non-null dual value) are presented here. Dual values are indicated as [0.001-0.01] when values are between 10⁻³ and 10⁻².

⁴ For each step, the most limiting constraint (*i.e.*, with the highest absolute value) is shown in bold.

⁵ DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

SUPPLEMENTAL TABLE 10. Amounts of energy and certain nutrients (largely contributed by meat), in the meat food groups calculated as the weighted average of the consumption of these food items in males (INCA3 survey, $n=564$)¹

	Males						
	Energy <i>kcal</i>	Vitamin A μg	Riboflavin <i>mg</i>	Vitamin B6 <i>mg</i>	Vitamin B12 μg	Iron <i>mg</i>	Heme iron <i>mg</i>
Nutrient content <i>/100g of food</i>							
Poultry	169	11.0	0.2	0.5	0.7	1.2	0.3
Beef and veal	174	4.1	0.2	0.4	2.2	2.5	1.6
Pork and other non-ruminant meats	207	3.2	0.3	0.4	1.0	1.5	0.9
Non-ruminant offal	148	2391.1	1.1	0.3	11.1	10.0	2.6
Non-ruminant processed meats	246	325.3	0.3	0.3	1.1	1.9	0.7
Lamb	193	2.5	0.2	0.2	2.1	1.6	0.7
Ruminant offal	142	1526.0	0.5	0.3	13.6	2.2	1.1
Ruminant processed meats	283	69.4	0.2	0.2	1.5	2.0	0.4

¹ Data were calculated from the data extracted from the CIQUAL table ("CIQUAL," 2016). See Methods for detailed information.

	Males						
	Non-heme iron	Selenium	Sodium	Zinc	Saturated fatty acids	Atherogenic fatty acids ¹	Protein
	<i>mg</i>	<i>μg</i>	<i>mg</i>	<i>mg</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>g</i>
Nutrient content							
<i>/100g of food</i>							
Poultry	0.9	14.3	179.2	1.6	2.0	1.5	26.9
Beef and veal	0.8	7.5	74.4	5.4	3.3	2.1	26.1
Pork and other non-ruminant meats	0.6	10.7	67.2	2.5	5.0	3.2	26.1
Non-ruminant offal	7.4	32.1	442.3	5.0	1.5	0.9	25.3
Non-ruminant processed meats	1.3	11.1	913.5	2.2	7.0	4.4	18.6
Lamb	0.9	8.6	69.7	4.3	3.8	2.3	26.4
Ruminant offal	1.2	16.0	200.7	2.5	2.2	1.3	19.4
Ruminant processed meats	1.6	5.0	927.0	3.2	12.0	6.6	19.9

¹ Atherogenic fatty acids, lauric and myristic and palmitic acids.

SUPPLEMENTAL TABLE 10 cont. Amounts of energy and certain nutrients (largely contributed by meat), in the meat food groups calculated as the weighted average of the consumption of these food items in females (INCA3 survey, *n*=561)

	Females						
	Energy	Vitamin A	Riboflavin	Vitamin B6	Vitamin B12	Iron	Heme iron
	<i>kcal</i>	<i>μg</i>	<i>mg</i>	<i>mg</i>	<i>μg</i>	<i>mg</i>	<i>mg</i>
Nutrient content							
<i>/100g of food</i>							
Poultry	163	11.1	0.2	0.5	0.6	1.1	0.3
Beef and veal	184	3.5	0.2	0.4	2.2	2.6	1.7
Pork and other non-ruminant meats	213	1.8	0.2	0.3	0.8	1.2	0.8
Non-ruminant offal	150	4.6	0.2	0.1	5.6	7.7	3.1
Non-ruminant processed meats	232	248.6	0.3	0.3	0.9	1.7	0.6
Lamb	194	2.1	0.2	0.2	2.1	1.7	0.8
Ruminant offal	176	2832.9	1.1	0.5	18.3	4.1	2.0
Ruminant processed meats	282	68.9	0.2	0.3	1.5	2.0	0.4

Data were calculated from the data extracted from the CIQUAL table ("*CIQUAL*," 2016). See Methods for detailed information.

	Females						
	Non-heme iron	Selenium	Sodium	Zinc	Saturated fatty acids	Atherogenic fatty acids ¹	Protein
	<i>mg</i>	<i>μg</i>	<i>mg</i>	<i>mg</i>	<i>g</i>	<i>g</i>	<i>g</i>
Nutrient content							
<i>/100g of food</i>							
Poultry	0.9	16.3	178.2	1.6	1.6	1.3	26.7
Beef and veal	0.9	7.1	77.7	5.5	3.8	2.4	26.0
Pork and other non-ruminant meats	0.4	13.4	54.2	2.5	5.4	3.3	26.7
Non-ruminant offal	4.6	31.8	704.8	5.1	1.3	0.9	27.7
Non-ruminant processed meats	1.0	10.5	880.7	2.2	6.5	4.0	18.4
Lamb	0.9	8.6	68.7	4.4	3.8	2.4	26.3
Ruminant offal	2.1	22.8	208.8	3.3	2.6	1.5	25.5
Ruminant processed meats	1.6	5.1	932.1	3.3	11.9	6.6	20.0

¹ Atherogenic fatty acids, lauric and myristic and palmitic acids.

SUPPLEMENTAL METHOD 1 Description of the methodological approach for the evaluation of environmental impact indicators

The environmental pressures associated with diets were estimated using indicators resulting from the matching of the 2497 foods items consumed in France with those of the French Agribalyse® 3.0.1 database developed by the French Agency for the Environment and Energy Management (ADEME) (Colomb et al., 2015).

Environmental indicator estimates were based on the Life Cycle Assessment (LCA) method whose scope is "from field to plate". The perimeter of the indicators covered each process in the value chain: production of raw materials, transport, processing, packaging, distribution and retailing, preparation by the consumer and disposal of packaging. These processes were split into two phases: 1) production and 2) post-farm. Of note, losses and waste (other than non-edible parts) at home, as well as transport from the retailer to the household, were not considered.

Overall, the method was based on international LCA standards: ISO 14040 ("iso.org," 2006b) and ISO 14044 ("iso.org," 2006a), LEAP guidelines (FAO, 2022) and PEF (European Commission, 2018) and the finalized indicators were given per kg of product and detailed by process.

For the agricultural phase of plant products, all upstream processes (notably input production) excluding storage or drying were included except for the ingredients in processed foods. In the case of animal products, all operations including production, transport and the storage of feed, the fattening of animals, milking, the construction and maintenance of buildings and machinery were considered. The scope chosen was consistent with those defined in GESTIM (Gac et al., 2011) and ecoinvent® (Nemecek and Kägi, 2007).

The LCI (life cycle inventory) data from AGRIBALYSE v3.0.1 covered the period 2005-2009, except for perennial crops (2000-2010). The variety of production systems was considered by applying coefficients based on the share of systems in national production. The allocation rules were varied and based on international recommendations as described by ISO 14040/14044 standards ("iso.org," 2006a; "iso.org," 2006b). In particular, allocations were developed in order to distribute organic nitrogen fertilizers and mineral fertilizers (P and K) between crop sequences. Biophysical allocations were used for animal production (milk versus meat). The biophysical models used for animal production and allocations by type of production are presented in the full report (Koch and Salou, 2020) according to AFNOR-BPX 30-323 (AFNOR, 2011) and in compliance with the ISO 14044 standard ("iso.org," 2006b) following three rules in descending order: 1) avoid allocation, 2) : biophysical allocation and 3) economic allocation.

A characterization method recommended by the European Commission (Environmental Footprint 3.0) translated the input and output flows of the inventory into impacts. For the background data (inputs

in construction, raw materials, etc.) the ecoinvent® database was used to assess indirect emissions (off-field emissions). The full methodology and methodological choices have been described elsewhere (Koch and Salou, 2020).

The pathway from commodities to foods for consumption introduced coefficients relative to the edible share and economic allocations between co-products. The recipes were broken down into ingredients, and for feasibility reasons a threshold of 95% of the ingredients was applied. Similarly, in terms of the origins of the ingredients, a threshold of 70% coverage was used, followed by a standardization step. The methodology and methodological adaptations as a whole have been described elsewhere (Asselin-Balençon et al., 2020) and post-farm estimates were aligned with the PEF guidelines (European Commission, 2018).

A total of 14 midpoint indicators were available: climate change, ozone depletion, particulate matter, ionizing radiation (effects on human health), ecotoxicity, photochemical ozone formation (effects on human health), acidification, terrestrial eutrophication, freshwater eutrophication, marine eutrophication, land use, water use, resource use, minerals and metals and resource use, and fossils. Concerning the indicators for foods consumed, and according to the guidelines of the PEF method (European Commission, 2018), a quality indicator (DQR) was provided and the AGRIBALYSE 3.0 database was reviewed and criticized by RIVM and GreenDelta as well as by French agricultural and agri-food technical institutes and "Peter Koch Consulting".

SUPPLEMENTAL METHOD 2. Description of the methodological approach to predict the absorption of iron and zinc from dietary intakes.

Because the absorption of iron and zinc is dependent on dietary factors, the requirements were based on bioavailable iron and zinc calculated from dietary intake using equations that predict their absorption.

We first of all considered heme iron (mainly present in red meat) and non-heme iron (present in other animal-based and plant-based foods) (Moretti, 2017). The following equation was used to determine the absorption of heme iron (Hallberg and Hulthén, 2000):

$$\text{Log Absorption (\%)} = 1.9897 - 0.3092 \times \log(\text{SF})$$

where SF is serum ferritin, which was set at 15 µg/L (Anses, 2021). A serum ferritin value of 15 µg/L corresponds to a lack of iron reserves and higher intestinal absorption, without any further functional impact (Walters et al., 1973). This value, when compared to 30 µg/L, enables a better estimate of iron absorption at marginal levels of iron intake.

For non-heme iron, we applied the following equation (Armah et al., 2013):

$$\text{Ln Absorption (\%)} = 6.294 - 0.709 \ln(\text{SF}) + 0.119 \ln(\text{C}) + 0.006 \ln(\text{MFP} + 0.1)$$

$$-0.055 \ln(\text{T} + 0.1) - 0.247 \ln(\text{P}) - 0.137 \ln(\text{Ca}) - 0.083 \ln(\text{NH})$$

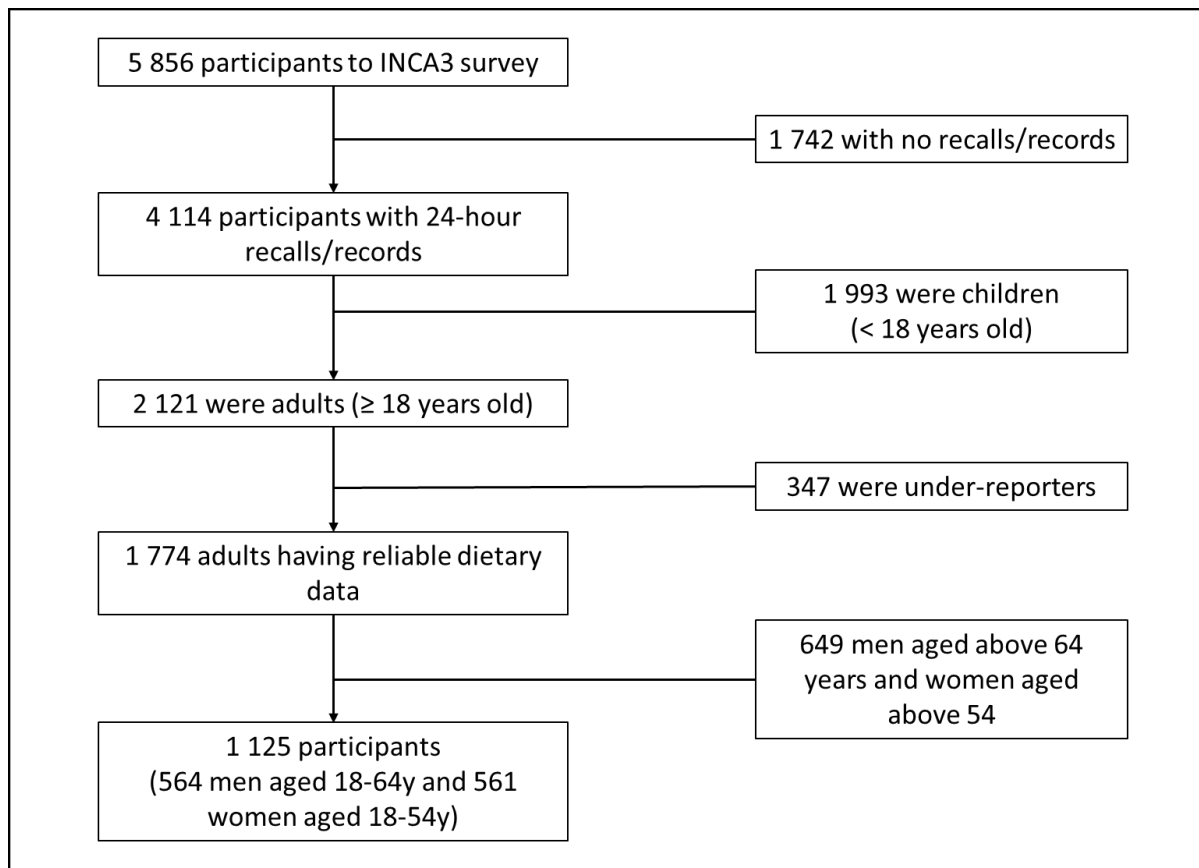
where SF is serum ferritin, which was also set at 15 µg/L, C is vitamin C (mg), MFP is meat, fish, and poultry (g), T is tea (number of cups), P is phytate (mg), Ca is calcium (mg), and NH is non-heme iron (mg).

For zinc absorption, we used the following equation (EFSA, 2014):

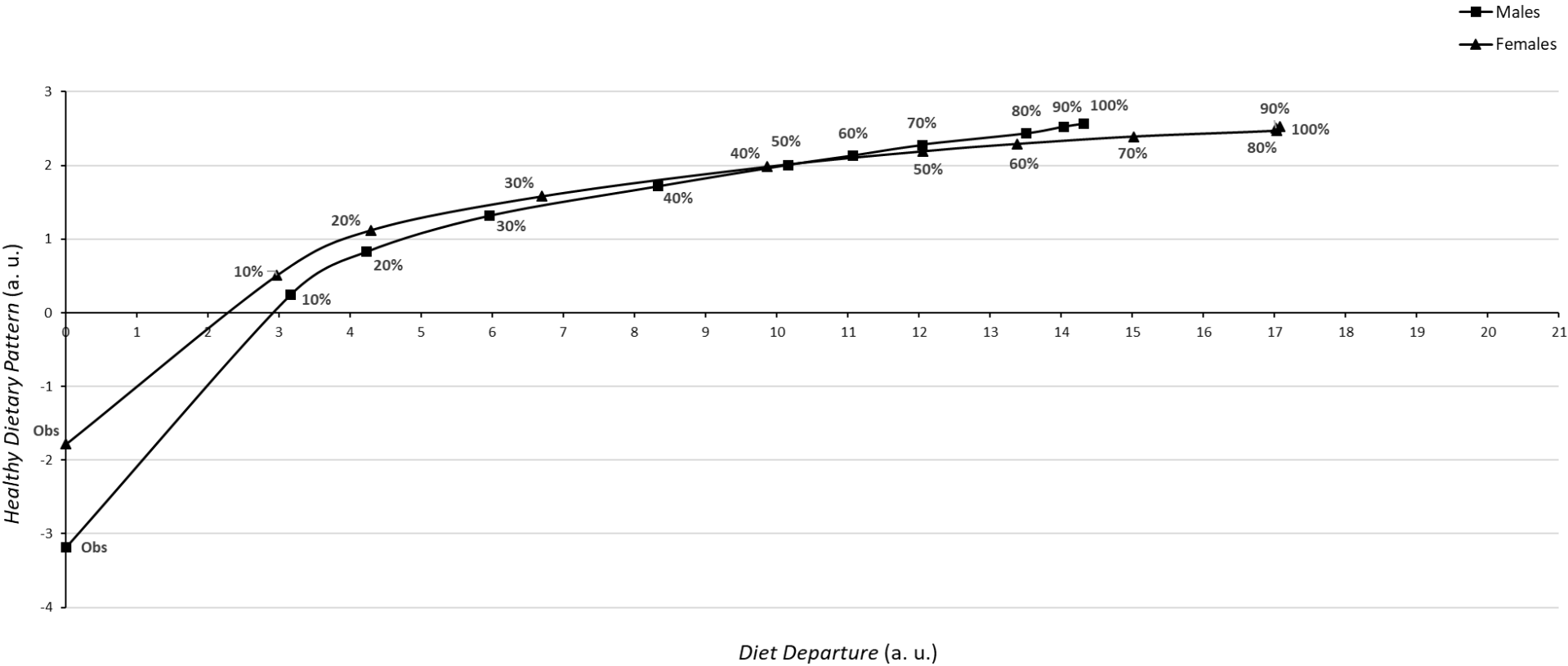
$$\text{TAZ} = 0.5 \times \left\{ 0.033 \times \left(1 + \frac{\text{TDP}}{0.68} \right) + 0.091 + \text{TDZ} - \sqrt{\left(0.033 \times \left(1 + \frac{\text{TDP}}{0.68} \right) + 0.091 + \text{TDZ} \right)^2 - 4 \times 0.091 \times \text{TDZ}} \right\}$$

where TAZ is bioavailable zinc (mmol), TDZ is dietary zinc (mmol) and TDP is dietary phytate (mmol).

SUPPLEMENTAL FIGURE 1. Flow chart which explains the sampling of French participants from the third Individual and National Study on Food Consumption Survey (INCA3) for the present study



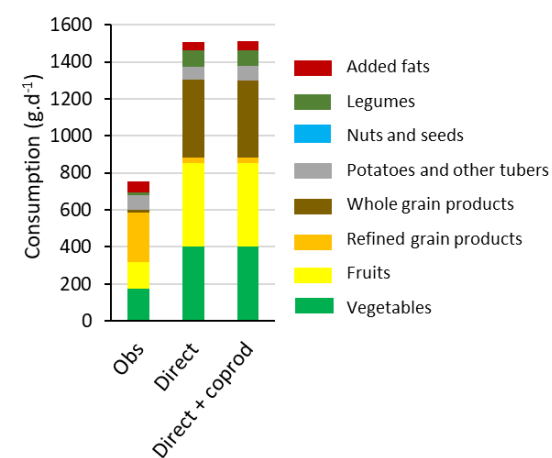
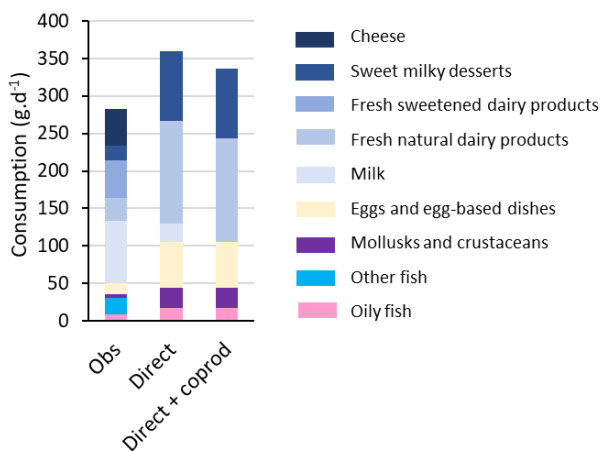
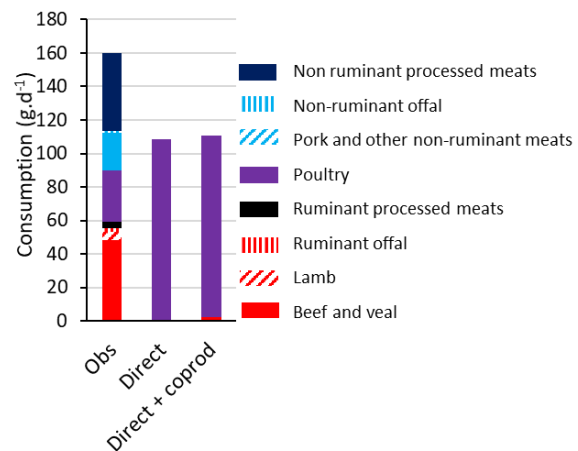
SUPPLEMENTAL FIGURE 2. Values of the *Healthy Dietary Pattern (HDP)* and *Diet Departure (DD)* criteria of the objective function of the initial observed diets and the diets modeled during a gradual reduction of ruminant meat consumption, in males and females



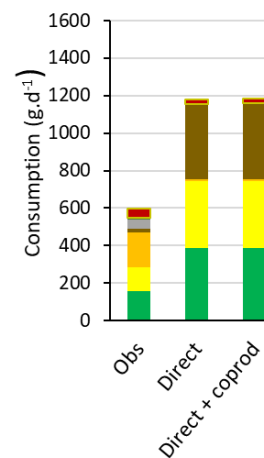
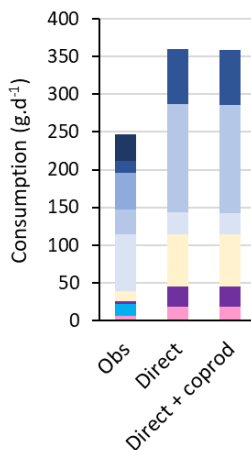
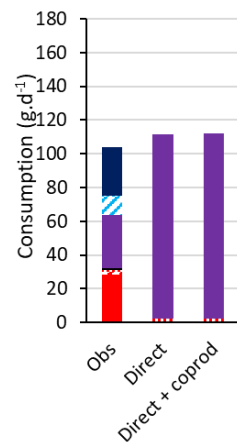
In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value.
 a.u., arbitrary unit.

SUPPLEMENTAL FIGURE 3. Average daily consumption of plant- or animal-based food groups in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier (direct scenario, “Direct”) or to be healthier with a coproduction link (direct scenario with a coproduction link, “Direct + coprod”) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

A. Males



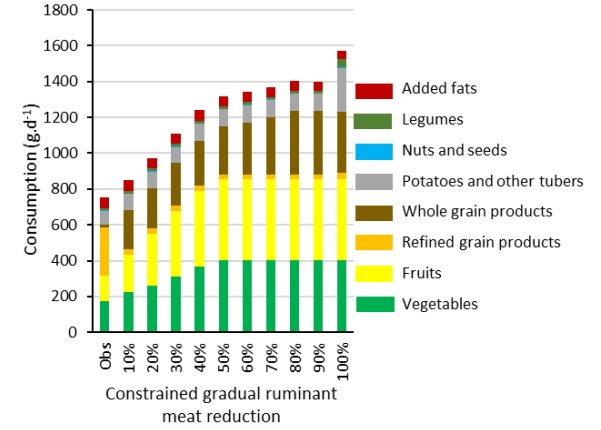
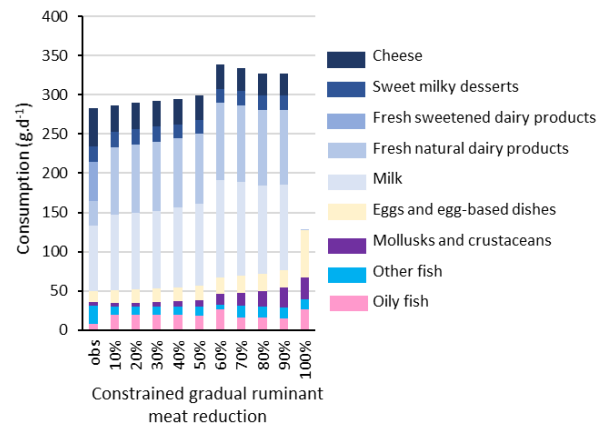
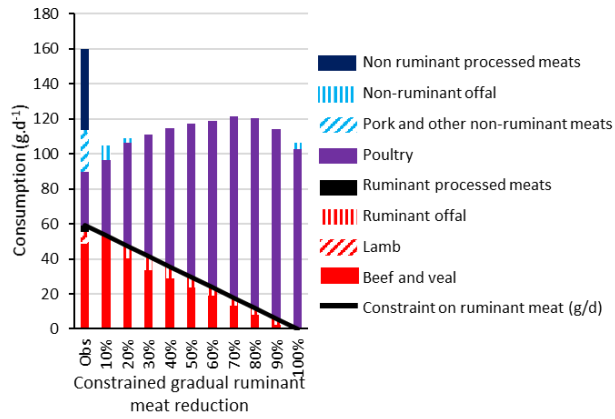
B. Females



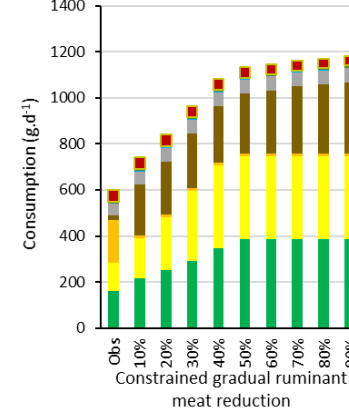
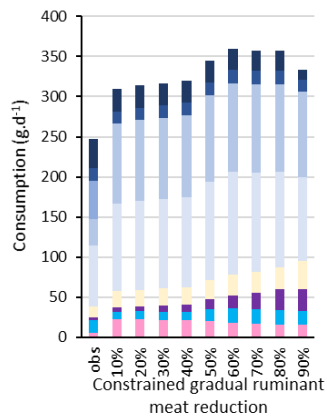
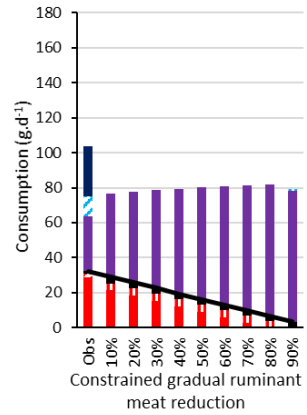
For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 2. Here, coproduct factors were added for ruminant products based on the fact that 10 g beef corresponds to 1 L milk, 1 L milk to 1 kg fresh dairy products and 8 L milk to 1 kg of cheese, as previously described (Kesse-Guyot et al., 2021).

SUPPLEMENTAL FIGURE 4. Average daily consumption of plant- or animal- based food groups in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) with a coproduction link in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

A. Males



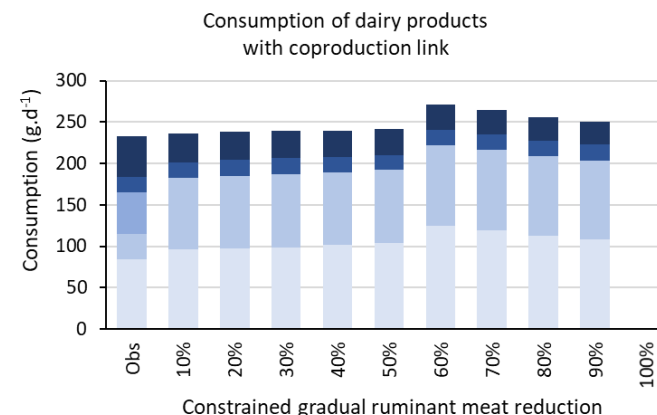
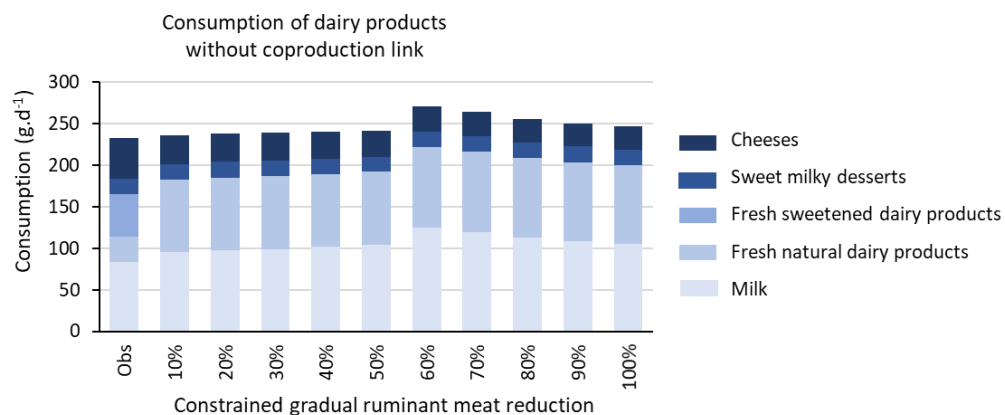
B. Females



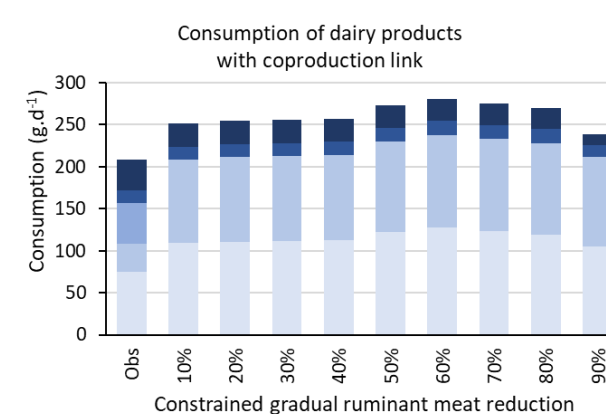
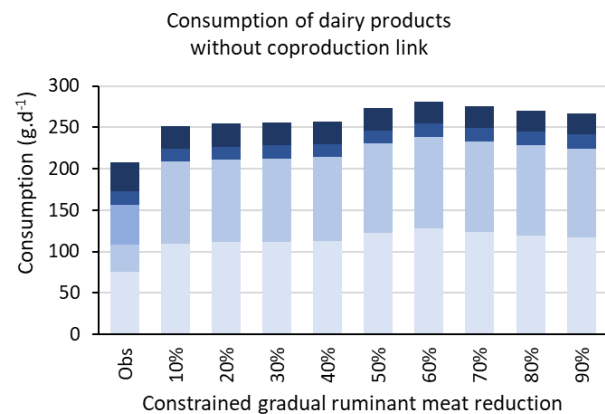
Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion. In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value. For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 2. Here, coproduct factors were added for ruminant products based on the fact that 10 g beef corresponds to 1 L milk, 1 L milk to 1 kg fresh dairy products and 8 L milk to 1 kg of cheese, as previously described (Kesse-Guyot et al., 2021). In women, modeled diets could be identified up to the 90% step of the meat reduction transition. Beyond this step, a modeled diet could no longer be identified.

SUPPLEMENTAL FIGURE 5. Focus on the average daily consumption of dairy products in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) with a coproduction link in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)

A. Males

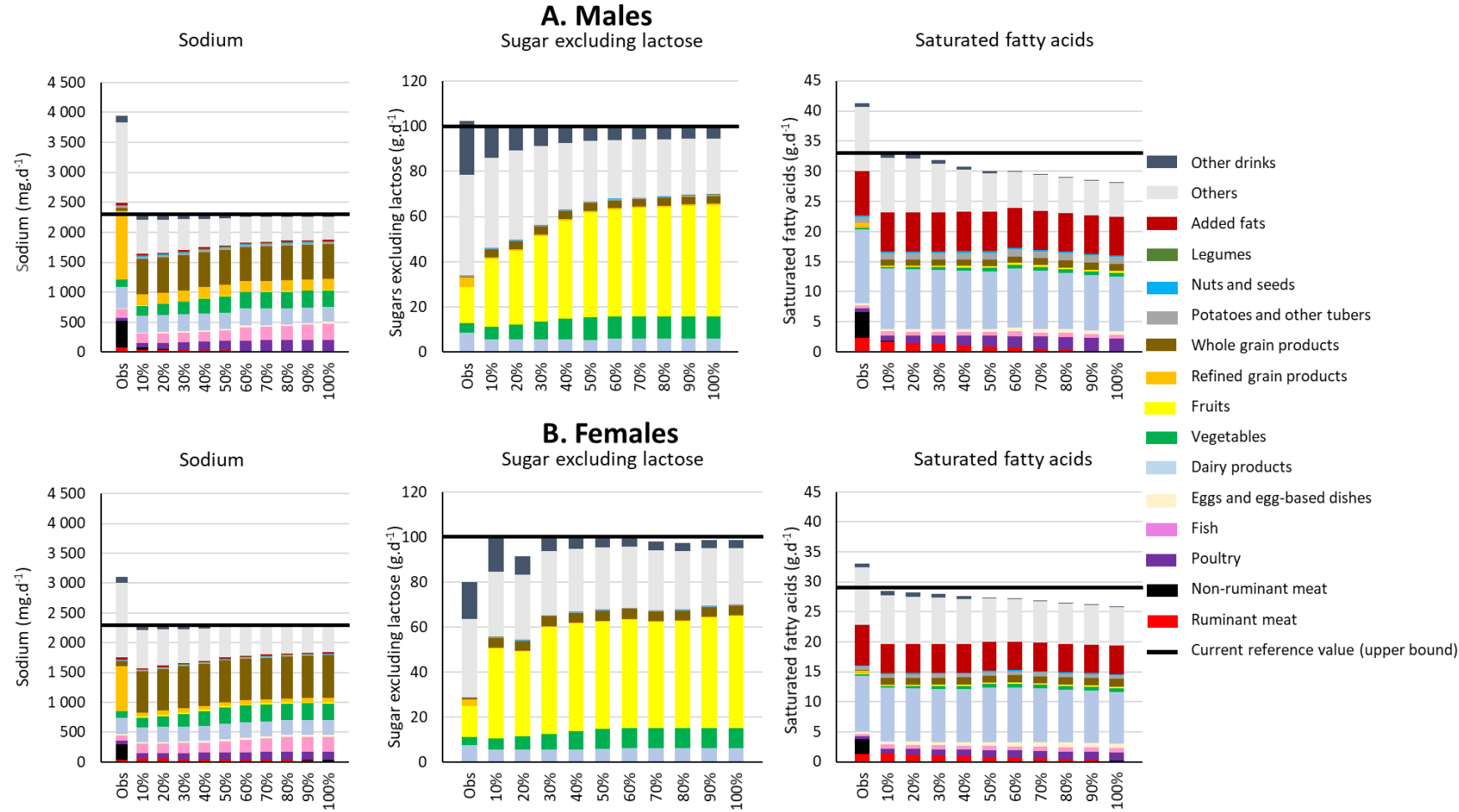


B. Females



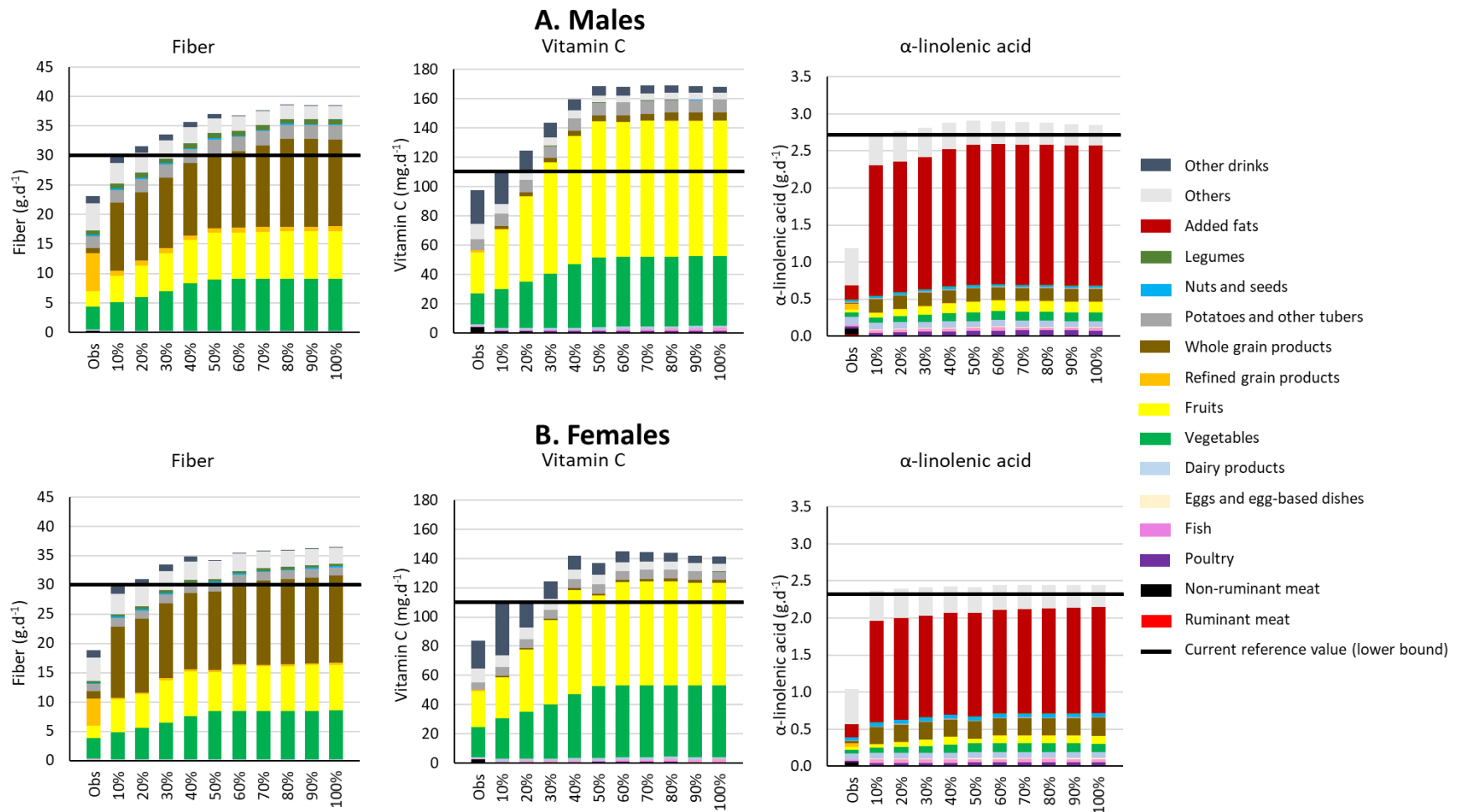
Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion. In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was reduced by x% of its observed value. Here, coproduct factors were added for ruminant products based on the fact that 10 g beef corresponds to 1 L milk, 1 L milk to 1 kg fresh dairy products and 8 L milk to 1 kg of cheese, as previously described (Kesse-Guyot et al., 2021). In women, modeled diets could be identified up to the 90% step of the meat reduction transition. Beyond this step, a modeled diet could no longer be identified.

SUPPLEMENTAL FIGURE 6. Contribution of food groups to sodium, sugar excluding lactose, and saturated fatty acids in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)



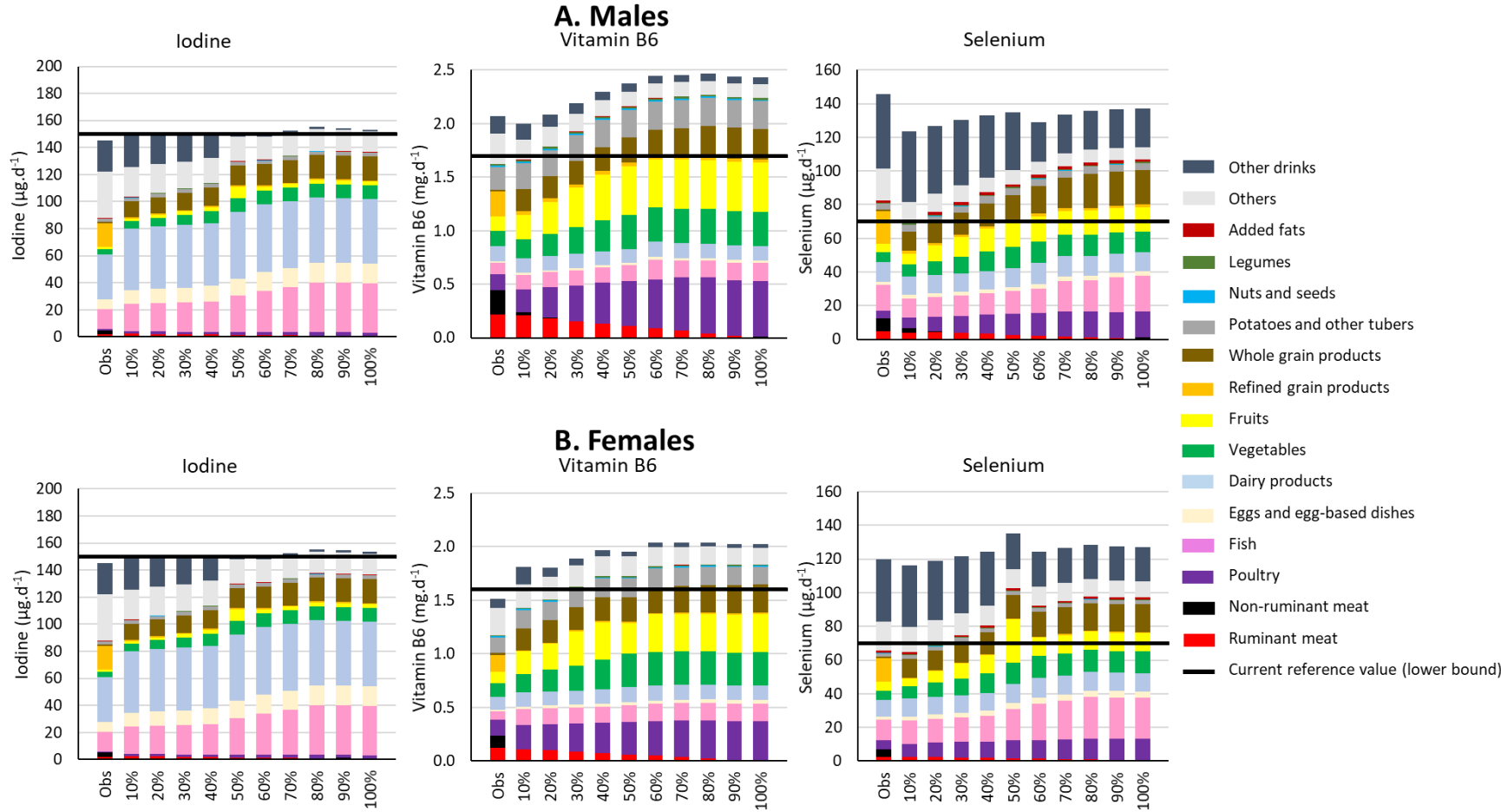
Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion. In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value. For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 2. For each nutrient, the current reference value is represented by a horizontal line.

SUPPLEMENTAL FIGURE 7. Contribution of food groups to fiber, vitamin C, and α -linolenic acid in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)



Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion. In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value. For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 2. For each nutrient, the current reference value is represented by a horizontal line.

SUPPLEMENTAL FIGURE 8. Contribution of food groups to iodine, vitamin B6, and selenium in observed (Obs) and modeled diets optimized to be healthier while taking account of dietary inertia during a gradual transition towards diets containing less ruminant meat (gradual scenario, by iterative steps of 10% reduction in ruminant meat up to 100%) in males (panel A) and females (panel B) (INCA3 survey, $n=564$ males and $n=561$ females)



Dietary inertia was modeled using the *Diet Departure* criterion. In each x% modeled scenario, total ruminant meat consumption was decreased by x% of its observed value. For clarity, all 48 modeled food groups are not shown here. Those not shown are presented in Supplemental Table 7 and detailed food categories are presented in Supplemental Table 2. For each nutrient, the current reference value is represented by a horizontal line.

References

- AGRIBALYSE 3.0, the French agricultural and food LCI database, methodology for food products (collective expertise report), 2020. . ADEME, Paris, France.
- 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, 1136–1140. <https://doi.org/10.3945/jn.112.169904>
- Asselin-Balençon, A., Broekema, R., Teulon, H., Aasvang, G.M., Houssier, J., Moutia, A., Rousseau, V., Wermeille, A., Colomb, V., 2020. AGRIBALYSE v3.0 : the French agricultural and food LCI database. Methodology for the food products.
- BP X30-323-5 (Afnor EDITIONS), 2011.
- Colomb, V., Amar, S.A., Mens, C.B., Gac, A., Gaillard, G., Koch, P., Mousset, J., Salou, T., Tailleur, A., Werf, H.M.G. van der, 2015. AGRIBALYSE®, the French LCI Database for agricultural products: high quality data for producers and environmental labelling. OCL 22, D104. <https://doi.org/10.1051/ocl/20140047>
- Dubuisson, C., Dufour, A., Carrillo, S., Drouillet-Pinard, P., Havard, S., Volatier, J.-L., 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 Nutrition* 22, 584–600. <https://doi.org/10.1017/S1368980018002896>
- Dussiot, A., Fouillet, H., Wang, J., Salomé, M., Huneau, J.-F., Kesse-Guyot, E., Mariotti, F., 2021. Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc – a diet optimization study in French Adults. *The American Journal of Clinical Nutrition*. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab373>
- European Commission, 2018. Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs) - version 6.3.

- Gac, A., Cariolle, M., Deltour, L., Dollé, J.B., Espagnol, S., Flénet, F., Guingand, N., Lagadec, S., Gall, A.L., Lellahi, A., Malaval, C., Ponchant, P., Tailleur, A., 2011. GES'TIM – des apports pour l'évaluation environnementale des activités agricoles. *Innovations Agronomiques* 17, 13.
- 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. <https://doi.org/10.1093/ajcn/71.5.1147>
- ISO 14040. Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes et cadre [WWW Document], 2006a. . iso.org. URL <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:fr> (accessed 10.3.22).
- ISO 14044. Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Exigences et lignes directrices [WWW Document], 2006b. . iso.org. URL <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:fr> (accessed 10.3.22).
- 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>
- Koch, P., Salou, T., 2020. AGRIBALYSE®: Rapport Méthodologique- Volet Agriculture- Version 3.0. ADEME, Angers, France.
- Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership, 2022. . Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Mariotti, F., Havard, S., Morise, A., Nadaud, P., Sirot, V., Wetzler, S., Margaritis, I., 2021. Perspective: Modeling Healthy Eating Patterns for Food-Based Dietary Guidelines-Scientific Concepts, Methodological Processes, Limitations, and Lessons. *Advances in Nutrition* 12, 590–599. <https://doi.org/10.1093/advances/nmaa176>
- Moretti, D., 2017. Plant-Based Diets and Iron Status, in: *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*. pp. 715–727.

Nemecek, T., Kägi, T., 2007. Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems Ecoinvent v2. 0, 361.

Opinion of the French Food Safety Agency on the benefits/risks of fish consumption (Collective expertise report), 2008. . French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Paris, France.

Scientific Opinion on Dietary Reference Values for zinc, 2014. . European Food Safety Authority (EFSA), Parma, Italy.

The ANSES-CIQUAL food composition table [WWW Document], 2016. URL <https://ciqual.anses.fr/#> (accessed 6.22.21).

The nutritional guideline update for vitamins and minerals (Collective expertise report), 2021. . French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Paris, France.

The Third Individual and National Survey on Food Consumption (INCA3 Survey), 2017. . French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Public Expert Report 24. <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf> [cited 2021 Jun 22]

Walters, G.O., Miller, F.M., Worwood, M., 1973. Serum ferritin concentration and iron stores in normal subjects. *Journal of Clinical Pathology* 26, 770–772.

Chapitre 3 – Discussion

I. Discussion générale

L'objectif de cette thèse était d'établir et de caractériser les régimes nutritionnellement les plus adaptés à des changements prospectifs de l'alimentation des français dans le sens d'une réduction de la consommation de viande, dans le but d'analyser les leviers et les freins aux échelles du nutriment et de l'aliment. Pour mener à bien ce projet, des méthodes d'optimisation non linéaire et multi-critères ont été utilisées afin de raisonner les différents scénarios de transition flexitarienne au niveau de la population française. Les résultats scientifiques ont révélé un conflit entre la mise en place de profils alimentaires favorables à la santé d'une part, et la couverture des valeurs de référence actuelles du fer et du zinc (en tenant compte de leur biodisponibilité) d'autre part. Nous avons également identifié et caractérisé des régimes sains, conformes aux profils diététiques favorables à la santé et nutritionnellement sûrs, jalonnant des transitions alimentaires de baisse de la consommation de viande jusqu'à sa suppression. Finalement, le travail s'est poursuivi par l'étude des régimes adéquats dans des modèles alimentaires correspondant à une baisse progressive de la consommation de viande issue de ruminants, puis par l'évaluation des pressions environnementales associées à ces régimes.

L'objectif de ce chapitre est de discuter de façon transversale les méthodes et résultats de cette thèse, en abordant les aspects suivants: (i) les aspects méthodologiques de la thèse, (ii) l'importance du conflit théorique attendu entre les transitions vers des régimes alimentaires majorant les sources végétales d'une part, et le respect des valeurs de référence actuelles du fer et du zinc biodisponibles d'autre part, (iii) la caractérisation nutritionnelle des régimes flexitariens, et (iv) la proportion de protéines végétales dans les régimes modélisés. Le **Tableau 12** résume les principaux résultats correspondant à chaque question de recherche, et les éléments de discussion qui seront évoqués dans ce chapitre.

Questions de recherche	Principaux résultats	Eléments abordés en discussion
<p>Question de recherche 1.1: Quelles quantités de fer et de zinc (Fe&Zn) biodisponibles a-t-on dans les régimes alimentaires occidentaux ? Dans quelle mesure le respect des valeurs de référence relatives aux Fe&Zn biodisponibles limite notre capacité à identifier des régimes alimentaires plus sains ?</p>	<p>Dans les régimes observés, le fer biodisponible était respectivement inférieur de -2% à sa valeur de référence chez les hommes, de -30% chez les femmes Fe- et de -52% chez les femmes Fe+, tandis que le zinc biodisponible était inférieur à -2% à sa valeur de référence quelle que soit la sous-population.</p> <p>Avec le scénario d'optimisation standard (NFlex), les valeurs de référence relatives aux Fe&Zn biodisponibles étaient les plus contraignantes parmi les 35 contraintes nutritionnelles.</p> <p>Les consommations de viandes et de produits céréaliers ont été largement redistribuées dans les régimes modélisés.</p> <p>Le scénario Flex a permis d'identifier des régimes encore plus sains, car ils contenaient encore moins de viande rouge et plus de produits céréaliers complets, mais ils étaient associés à une prévalence de l'anémie ferriprive égale à 5% tous sexes confondus.</p> <p>Globalement, en termes de DALYs, étant donné que la perte due à l'anémie représenterait <30% du gain autrement réalisé sur les maladies chroniques, l'ajout d'une flexibilité dans les valeurs de référence du Fe&Zn biodisponibles entraînerait une diminution supplémentaire de 18% de la charge de morbidité.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1) Paramétrage des solutions obtenues en sortie du modèle 2) Pertinence de l'objectif de santé 3) Compromis entre les deux objectifs du modèle (santé/inertie alimentaire) 4) Classement des contraintes de la plus à la moins limitantes (afin d'identifier les valeurs nutritionnelles qui ont le plus d'influence sur les solutions) 5) Intérêt de prendre en compte la biodisponibilité des nutriments dans les modèles optimisant ou maximisant la valeur nutritionnelle des régimes
<p>Question de recherche 2.1: Quelles modifications du régime alimentaire</p>	<p>Chez les deux sexes, il a été possibles d'identifier des régimes sains, conformes aux profils diététiques favorables à la santé et nutritionnellement</p>	

<p>devraient être apportées lors de la diminution de la consommation de viande pour maintenir ou améliorer la qualité du régime alimentaire ? Quels sont les problèmes nutritionnels les plus saillants, et les groupes alimentaires pour lesquels des changements de consommation permettraient de fournir ces nutriments limitants ?</p>	<p>sûrs, jalonnant des transitions alimentaires de baisse de la viande jusqu'à sa suppression.</p> <p>Les changements les plus significatifs se sont produits au début du processus de transition modélisé, avec des réductions drastiques des viandes transformée et rouge au profit de la volaille, qui est rapidement devenue la viande prédominante avant de passer progressivement d'une réduction de 50% à 100% de la viande.</p>	<p>6) Maintien des quantités de fer à des niveaux plus élevés que le seuil de carence</p> <p>7) Remaniements diététiques au cours des transitions</p> <p>8) Nutriments les plus limitants eu égard à la baisse de la viande</p>
<p>Question de recherche 2.2: Dans quelle mesure des régimes contenant de moins en moins de viande de ruminants peuvent être sains et nutritionnellement adéquats, tout en restant compatibles avec les autres habitudes alimentaires ? Quelles sont les répercussions en termes de pressions environnementales associées aux régimes modélisés (par rapport aux régimes observés) ?</p>	<p>Des régimes alimentaires sains et nutritionnellement adéquats sans viande de ruminants peuvent être identifiés dans des scénarios de suppression directe ou de réduction progressive.</p> <p>Dans les deux scénarios, la viande de ruminants et la viande rouge ont été aisément remplacées par de la volaille, avec une adéquation totale pour tous les apports en nutriments.</p> <p>Ces changements alimentaires ont permis de réduire les pressions environnementales liées au changement climatique.</p>	<p>9) Nutriments auxquels la viande contribuait beaucoup aux apports dans les régimes observés mais non limitants lors de la baisse de la viande</p> <p>10) Rapport protéines animales/protéines végétales dans les régimes alimentaires modélisés</p>

Tableau 12. Résumé des principaux éléments de discussion relatifs à chacune des questions de recherche, et comparaison avec d'autres études

a. Aspects méthodologiques de la thèse

Au cours de cette thèse, un modèle d'optimisation contraint, non linéaire, et à objectifs multiples a été développé. Plusieurs décisions prises au cours du développement de ce modèle ont affecté les solutions. Il convient de souligner que les résultats d'optimisation obtenus sont dépendants des paramétrages utilisés et reposent donc sur des choix et compromis, tels que le choix des bornes de consommation des groupes d'aliments aux 5^e et 95^e centiles, le choix des contraintes rendues flexibles, le choix des groupes d'aliments pour lesquels une substitution a été autorisée, ou le choix de pondérer la composition nutritionnelle de chaque groupe d'aliments par leurs niveaux de consommation. Des sources d'incertitudes ont également été identifiées dans toutes les données d'entrée de l'outil, notamment, les données de composition nutritionnelle, les données de consommation françaises (INCA3) et les données d'analyse du cycle de vie (ACV) pour les aliments consommés, mais aussi, au niveau des valeurs de référence d'ordre nutritionnel.

1) Un choix méthodologique important a été de privilégier des solutions uniques en sortie du modèle d'optimisation, chaque scénario ayant abouti à un optimum global caractérisé par une combinaison unique des variables de décision. Les variables de décision du modèle étaient les consommations quotidiennes moyennes de 45 groupes alimentaires dans les **projets n°1 et 2**, étendus à 48 groupes dans le **projet n°3** afin d'affiner la catégorisation des viandes (**annexe 2**). Une option alternative non retenue dans le cadre de cette thèse aurait été de décrire un ensemble de familles de solutions équivalentes, en calculant les écart-types possibles pour chaque variable de décision, afin d'avoir une visibilité sur l'espace de l'ensemble des solutions suboptimales. Le choix de privilégier des solutions uniques en sortie du modèle a été effectué notamment par souci de clarté, pour limiter le temps d'opération, et pour faciliter les analyses de sensibilité sur les freins nutritionnels (identifiés comme les contraintes limitantes de besoins en nutriments) et les leviers diététiques (identifiés comme des changements dans les groupes alimentaires qui fournissent les nutriments limitants).

2) Le premier objectif de ce modèle était de maximiser l'adhésion à un profil diététique sain sur la base des recommandations alimentaires actuelles (Cocking *et al.*, 2020; Harguess *et al.*, 2020; Santé Publique France, 2019b; Anses, 2016a) à l'instar de l'objectif utilisé dans le modèle d'optimisation que l'Anses a retenu pour identifier des régimes dans le cadre du travail

scientifique pour l'actualisation des repères du PNNS (Mariotti *et al.*, 2021). Plus précisément, cet objectif consistait en une diminution maximale de la viande rouge (incluant les abats), de la viande transformée et des boissons sucrées, ainsi qu'en l'augmentation de certains groupes alimentaires favorables à la santé (produits céréaliers complets, fruits et légumes), bornée aux 95^e centiles des consommations observées. Dans un travail collaboratif présenté en **annexe 4** qui visait à explorer le lien entre la proportion de protéines végétales dans l'alimentation et la santé globale, nous avons utilisé un modèle très similaire, mais cet objectif a été redéfini sur la base des recommandations du GBD les plus récentes (GBD Risk Factors Collaborators, 2020), et consistait alors à limiter les consommations des même 3 groupes d'aliments néfastes pour la santé (viande rouge, viande transformée et boissons sucrées) tout en favorisant celles de 6 groupes d'aliments favorables à la santé parmi lesquels 3 nouveaux groupes (produits céréaliers complets, fruits, légumes, ainsi que légumineuses, noix et graines, et lait), chaque fois jusqu'aux niveaux minimaux théoriques d'exposition au risque (TMREL), et en pondérant chaque terme de l'objectif par les DALYs relatifs à la population française. Ces DALYs correspondaient aux nombres d'années de vie perdues chaque année au niveau de la population française, et ont été estimés sur la base des écarts entre les habitudes de consommation et les TMREL pour chaque groupe alimentaire (GBD, 2022). Les valeurs des TMREL étaient de 0 g/j pour la viande rouge, la viande transformée et les boissons sucrées, et également établis pour les produits céréaliers complets (150 g/j), les fruits (325 g/j), les légumes (300 g/j), les légumineuses (95 g/j), les noix et les graines (14,5 g/j), et le lait (430 g/j). Le codage du critère de santé dans ce travail collaboratif s'est inspiré de la méthode développée tout récemment dans une publication qui utilise la plupart de ces TMREL en contraintes du modèle d'optimisation (Walker *et al.*, 2021). Dans mes **projets n°1 à 3**, les consommations des groupes alimentaires sains (produits céréaliers complets, fruits et légumes) ont été maximisées potentiellement jusqu'à l'atteinte des 95^e centiles de consommation pour chaque sexe. La maximisation des consommations de ces groupes alimentaires sains repose sur l'hypothèse la plus simple d'une relation monotone entre consommation et facteur protecteur vis-à-vis des risques de pathologies, tandis que, pour comparaison avec le travail collaboratif, les seuils des TMREL correspondaient à une moyenne pondérée des 85^e centiles dans les populations étudiées lors des études d'observation.

Le processus d'optimisation tend à combiner des phénomènes qui sont interdépendants. Par exemple, l'augmentation dans les régimes modélisés des quantités consommées des groupes alimentaires favorables à la santé (qui sont d'origine végétale) s'accompagne d'une augmentation des apports en phytates inhibant l'absorption du fer et du zinc qui est un facteur très limitant du processus d'optimisation (comme évoqués précédemment). En effet, les aliments végétaux contiennent des facteurs anti-nutritionnels qui peuvent entraîner une biodisponibilité moindre (Agnoli *et al.*, 2017).

Il est nécessaire de mieux évaluer les conséquences sur la santé de la végétalisation actuelle des régimes des français, en ayant recours à des approches larges d'évaluation du bénéfice et du risque pour la santé. Des régimes riches en aliments d'origine végétale, comprenant uniquement des produits cultivés de manière conventionnelle, pourraient être associés à une plus forte exposition aux résidus de pesticides (Baudry *et al.*, 2021). Par exemple, les fruits et légumes sont les groupes d'aliments présentant les niveaux les plus élevés de résidus de pesticides (EFSA, 2019). Comme évoqué dans l'introduction bibliographique, de nouvelles préoccupations nécessitent des études supplémentaires, afin de mieux prendre en compte les impacts des modes de production et des procédés sur la qualité sanitaire et nutritionnelle des produits. Ces nouvelles préoccupations concernent à la fois les aliments d'origine végétale et ceux d'origine animale. Par exemple, il existe également des risques microbiologiques et chimiques (zoonoses, antibiorésistance) liés aux produits de l'élevage.

3) Un autre aspect méthodologique sur lequel il semble intéressant de revenir est la définition du second objectif du modèle d'optimisation, à savoir le critère de minimisation de l'écart au régime initial (*DD*). Le critère *DD* a été utilisé pour minimiser les différences entre les quantités d'aliments observées et optimisées, afin de préserver au mieux les habitudes alimentaires de la population. Une analyse complémentaire (n'ayant pas fait l'objet d'une publication) a été effectuée sur chaque scénario des **projets n°1 à 3** pour donner une estimation chiffrée de l'effort à faire pour combattre l'inertie alimentaire si on veut tendre vers des régimes davantage sains. Pour cela, nous avons évalué l'écart au régime moyen observé relatif à chaque régime modélisé (« *DDmod* »), puis comparé cet écart à la dispersion des consommations individuelles des 1 125 individus de la population adulte (18-64 ans) de l'étude INCA3 (« *DDobs* »). Dans le **projet n°1**, les régimes modélisés étaient peu distants des régimes moyens observés quel que soit le scénario. Sur le plan quantitatif, on obtenait un

rapport « *DDmod* »/écart-type de « *DDobs* » égal à ~20%. La modélisation par optimisation des régimes alimentaires peuvent exacerber les incertitudes et reposent sur une définition complexe des contraintes et des objectifs, qui implique souvent une pondération implicite de nombreux critères. A ce titre, nous avons évalué le compromis entre les deux objectifs du modèle d'optimisation (*Santé/DD*), et montré que les scénarios NFlex et Flex favorisaient le second objectif *DD* par rapport au premier objectif *Santé*, alors que nous avons fait le choix le plus simple de ne pas pondérer un objectif plus qu'un autre. Cette analyse complémentaire de la modélisation des compromis (CP) a donc montré que les régimes modélisés étaient relativement conservés par rapport au point de départ si les objectifs étaient équipondérés par défaut. Cependant, les scénarios NFlex+ et Flex+ présentés en données supplémentaires dans le **projet n°1** et qui consistaient à optimiser uniquement selon l'objectif *Santé*, permettaient de s'éloigner de 2 écart-types de « *DDobs* ». Ainsi, en relâchant l'inertie alimentaire, les régimes modélisés s'éloignaient davantage du régime moyen observé pour améliorer leur valeur santé, et ces régimes devenaient similaires aux régimes observés INCA3 les plus éloignés. Du point de vue de l'éloignement au régime moyen, ils se situaient autour des 85^e-90^e centiles. Dans le **projet n°2** et dans le scénario graduel du **projet n°3**, nous avons choisi de réduire le poids de l'inertie alimentaire pour décrire une transition flexitarienne en s'éloignant progressivement des régimes préservant au mieux les habitudes alimentaires. Afin de dépeindre un changement progressif d'attitude (en optimisant à chaque étape à partir du régime modélisé de l'étape précédente), la modélisation de régimes alimentaires sains a été conduite en réduisant la viande par étapes successives (avec un pas de réduction de 10% à chaque étape). Les régimes végétariens ne seraient pas nécessairement bien acceptés par la plupart de la population française (de Boer and Aiking, 2022). Nous avons estimé les compromis entre les différentes dimensions de nutrition/santé et d'acceptabilité qui s'opèrent pour aboutir à des régimes optimisés avec des faibles niveaux de consommation de viande. Notamment, dans le scénario graduel de baisse de la viande de ruminants du **projet n°3**, le rapport « *DDmod* »/écart-type de « *DDobs* » variait de 11% (à l'étape de 10% de baisse) jusqu'à 61% (à l'étape finale, sans viande de ruminants) tous sexes confondus. Ces déviations par rapport aux régimes observés, qui impliquent des réarrangements modérées au sein et entre les groupes alimentaires (autres que la viande de ruminants), suggèrent que l'adéquation à la plupart des références nutritionnelles est envisageable assez facilement avec le suivi de régimes pauvres ou sans viande de ruminants. Ce constat est intéressant car ce type

de régime pourrait être mieux accepté par le plus grand nombre puisque les régimes végétariens (contrairement aux régimes type « flexitarien ») restent rares dans les pays européens (*FranceAgriMer*, 2019). Le scénario graduel du **projet n°3** permet de conclure qu'un régime sans viande de ruminants, caractérisé par une consommation relativement faible de viande, à savoir 96 g/j de viande totale (en incluant 93 g/j de volaille), ce qui correspond à ~5-6 portions/semaine tous sexes confondus, ainsi que par des consommations accrues de fruits, légumes, et produits céréaliers complets, pourrait être un compromis acceptable pour la population générale (qui n'est peut-être pas prête à « abandonner » totalement la viande). Nous avons montré que ce régime serait sain, et 30% moins dommageable que celui du régime français actuel (2014-2015), en ce qui concerne les pressions sur le changement climatique.

4) Par ailleurs, l'une des principales exigences du modèle d'optimisation était de garantir des apports adéquats en macro- et micronutriments dans les régimes modélisés. Les régimes devaient couvrir les références nutritionnelles les plus récentes de l'Anses pour chaque sexe (*Anses*, 2021). Comme évoqué dans l'introduction, la technique d'optimisation présente l'avantage de pouvoir estimer les valeurs des « duals » associées à chaque contrainte, c'est-à-dire, les estimations du gain potentiel de la fonction objectif qui résulterait de l'assouplissement d'une unité de la borne limitante de la contrainte considérée (*Bazaraa et al.*, 2006; *Mausser et al.*, 2006). Par exemple, une valeur égale à -0,08 rend compte d'un potentiel d'amélioration de 0,08 dans la fonction objectif du modèle à minimiser, et plus précisément, le signe négatif signifie que c'est la borne supérieure de la contrainte qui est limitante. Dans les **projets n°1 à 3**, les contraintes sur les apports en nutriments ont été classées de la plus à la moins limitante. Ce classement a permis de conduire des analyses de sensibilité très instructives, pour comprendre les valeurs nutritionnelles qui ont le plus d'influence sur les solutions et étudier l'impact du relâchement de certaines contraintes sur les références nutritionnelles. Toutes les contraintes ont été normalisées par la valeur de leurs bornes attractives limitantes, de sorte que les valeurs des « duals » normalisées (représentant l'effet d'un relâchement de 100% de la limite) puissent être comparées numériquement entre elles. Nous avons retenu cette méthode de normalisation des contraintes nutritionnelles après avoir testé des méthodes alternatives. Par exemple, normaliser, non plus par la borne limitante, mais par les écart-types des apports en nutriments, n'affectait pas le classement

des contraintes, c'est-à-dire que quelque soit la méthode, on obtenait à peu près le même classement des contraintes des plus aux moins limitantes. Nous avons mis en évidence que l'activité d'une contrainte pouvait masquer l'activité d'une autre, lorsqu'elles agissent de conserve et induisent les mêmes changements alimentaires (par exemple, les contraintes sur le fer et le zinc biodisponibles, chez les deux sexes).

b. Caractériser l'importance du conflit théorique attendu entre les transitions vers des régimes alimentaires végétalisés, et le respect des valeurs de référence actuelles du fer et du zinc biodisponibles

5) Dans le **projet n°1**, avec le scénario d'optimisation standard (NFlex), puisque les valeurs de référence relatives aux Fe&Zn biodisponibles étaient les plus contraignantes parmi les 35 contraintes nutritionnelles, nous avons toléré que les quantités de fer et de zinc biodisponibles dans les régimes modélisés soient en-dessous des valeurs de référence. Néanmoins, ces quantités ont été garanties supérieures à des seuils de carence correspondant à l'apport minimal qui limiterait la probabilité d'une carence nutritionnelle, comme décrit précédemment (Salomé, Kesse-Guyot, *et al.*, 2021). Le seuil de carence en fer biodisponible a été recalibré pour correspondre à la prévalence de l'anémie ferriprive dans la population française (*Santé Publique France*, 2019a). Puis, dans les **projets n°2 et 3**, les quantités de ces nutriments ont été garanties à des seuils de sécurité, c'est-à-dire à des niveaux limitant la prévalence de la carence à 5% dans chaque population. On peut lire sur le tableau 4 de l'article publié relatif au **projet n°1** les modifications attendues en termes de morbi/mortalité chez les adultes français qui résulteraient de l'adoption des régimes modélisés par rapport aux régimes observés. Le régime moyen observé, tel que décrit à partir des données de consommations individuelles INCA3, était globalement plus mauvais chez les hommes (18-64 ans) que chez les femmes (18-54 ans). Les femmes avaient donc de meilleures habitudes alimentaires au moment de l'étude, en 2014-2015. En termes de DALYs, l'optimisation de ce régime moyen observé selon le scénario NFlex induirait un gain sur les maladies chroniques (risque cardiométabolique et cancer colorectal) 7 fois plus élevé chez les hommes (forte amélioration de la qualité de leur alimentation) que chez les femmes. En revanche, si on compare les DALYs relatifs aux régimes identifiés selon les deux scénarios, soit sans flexibilité sur le fer et le zinc biodisponibles (NFlex), soit avec une certaine flexibilité (Flex), alors le gain supplémentaire avec le scénario Flex est de +20% et de +70% chez les hommes et chez les femmes

respectivement. L'amélioration plus prononcée chez les femmes avec le scénario Flex confirme que la contrainte sur les quantités de fer biodisponible est très limitante dans le scénario NFlex chez les femmes et bride les évolutions des consommations alimentaires dans le sens du suivi des recommandations alimentaires. Autrement dit, chez les femmes notamment, le maintien des besoins en fer et zinc biodisponibles au niveau des valeurs de référence nutritionnelles (scénario NFlex) permettait d'assurer dans les régimes modélisés des quantités en Fe&Zn biodisponibles très satisfaisantes vis-à-vis du besoin, mais était contre-productif pour l'identification de régimes globalement plus sains au regard du risque cardiométabolique entre autres. En corrolaire, chez les femmes, la forte augmentation du gain santé (+70%) avec le scénario Flex (par rapport à NFlex qui est encore très contraint) compense l'augmentation de l'anémie ferriprive. Au final, le fardeau de l'anémie chez les femmes n'est que de 44% du gain relatif à la prévention des maladies chroniques, tandis qu'il est de 20% chez les hommes, alors que la prévalence de l'anémie (en valeur absolue) augmente bien davantage chez les femmes que chez les hommes.

6) Il est à noter que dans le scénario Flex, les quantités de fer dans les régimes modélisés atteignent le seuil de risque de carence chez les femmes de besoin en fer élevé. Bien que les effets néfastes sur la santé de la déficience en fer sans anémie aient été mal caractérisés dans les études publiées, en raison de la petite taille des échantillons, de la confusion avec d'autres facteurs liés à l'alimentation et au mode de vie, et des altérations du métabolisme du fer en réponse à une infection, on peut supposer que des quantités de fer à des niveaux plus élevés que le seuil de carence pourraient avoir des avantages pour la santé en prévenant la déficience en fer sans anémie. Il est clair que des recherches supplémentaires sont nécessaires pour caractériser la relation entre l'apport en fer et la déficience en fer sans anémie chez les adultes des pays occidentaux, et évaluer son importance pour la santé. Jusqu'à présent, les seuils à partir desquels des effets indésirables liés à l'insuffisance d'apport en fer peuvent se développer n'ont pas été bien caractérisés (SACN, 2010).

[c. Apport de cette thèse à l'analyse des freins nutritionnels et leviers diététiques à la diminution de la consommation de viande \(viande totale, puis viande de ruminants\)](#)

Lors des transitions de baisse de la viande, nous avons voulu savoir quels apports en macro- et micronutriments d'intérêt pouvaient être facilement augmentés, et surtout lesquels étaient

des points d'achoppement, mais aussi dans quelle mesure les consommations de certains groupes d'aliments pouvaient être augmentées de façon acceptable pour palier aux nutriments venant à manquer.

7) Dès les premières étapes des transitions graduelles vers des régimes contenant de moins en moins de viande, d'importantes réorganisations dans les consommations alimentaires ont été opérées pour satisfaire les références nutritionnelles, lorsque ces références n'étaient pas satisfaites dans les régimes observés. Dans les **projets n°2 et 3**, les apports en certains nutriments dans les régimes modélisés étaient davantage en adéquation avec les besoins par rapport aux apports observés. Les régimes modélisés contenaient moins de sel, d'AGS et de sucres. Ils contenaient aussi plus de fibres, de vitamine C, d'AGPI, de potassium et d'iode. Par exemple, dans le **projet n°2** (qui consistait à baisser la viande totale), les féculents raffinés, les compotes, les produits laitiers frais sucrés, les huiles végétales pauvres en acide α -linoléique (ALA), et les soupes (ce dernier groupe chez les hommes uniquement) ont été complètement ou presque complètement supprimés des régimes dès l'étape 10%, suggérant que ces groupes n'étaient pas les meilleurs vecteurs de nutriments favorables, ou bien étaient des vecteurs de nutriments à limiter.

8) Aux étapes suivantes, des nutriments étaient limitants mais non bloquants. Chez les deux sexes, les nutriments limitants à toutes ou certaines étapes des transitions étaient les vitamines A et C, l'iode, le potassium, le sodium, les AGS, les acides gras athérogènes, l'ALA, l'EPA+DHA, les sucres (hors lactose) et les fibres. A cette liste, s'ajoutent le fer biodisponible et le potassium chez les femmes lors d'une baisse de la viande totale, ainsi que le calcium chez les femmes, et l'eau chez les hommes lors d'une baisse de la viande de ruminants. En particulier, le fer et le zinc biodisponibles, ainsi que la vitamine A étaient les nutriments les plus limitants eu égard à la baisse de la viande (totale ou de ruminants), parce qu'il a fallu trouver des leviers au fur et à mesure de la baisse de la viande. La littérature scientifique est abondante au sujet des niveaux d'apports en nutriments selon les types de régimes végétalisés, et des apports en certains nutriments sont potentiellement inadéquats (Derbyshire, 2020; Lonnie and Johnstone, 2020; Mariotti *et al.*, 2021). L'évaluation de plusieurs revues systématiques et de méta-analyses, rassemblant les éléments probants de 95 études distinctes et de six études d'observation, a conclu que les insuffisances d'apports en fer, zinc, et vitamines B12 et D seraient parmi les plus fréquentes chez les lacto-ovo-

végétariens, les ovovégétariens, les végétaliens, les pescatariens et les semi-végétariens ou flexitariens (Derbyshire, 2020). Dans cette thèse, nous avons montré qu'à partir d'une baisse de la viande totale de 70% par rapport à sa consommation observée, le fait de forcer les modifications alimentaires vers de moins en moins de viande a conduit à des points d'achoppement concernant le fer et le zinc biodisponibles, dont l'adéquation nutritionnelle (sans flexibilité) ne semblait pas pouvoir être augmentée. Autrement dit, à partir de 70%, le maintien des quantités de fer et zinc biodisponibles satisfaisant les références nutritionnelles actuelles ne permettait pas d'obtenir des régimes modélisés encore plus sains, tout en étant nutritionnellement sûrs et relativement proches des autres consommations alimentaires, et ce chez les deux sexes. Lors d'une baisse de la viande de ruminants uniquement, le maintien des quantités aux références nutritionnelles nécessitait pour satisfaire ces valeurs de référence élevées de maintenir de la viande de porc, en plus d'augmenter fortement les consommations de volaille (au 95^e centiles de consommation). Les modèles optimisant ou maximisant l'adéquation nutritionnelle des régimes seraient donc sensibles à la prise en compte de la biodisponibilité des nutriments. Il semble donc essentiel de prendre en compte ce facteur lors des modélisations futures. La biodisponibilité du fer et du zinc peut être calculée de façon relativement simple à l'échelle d'un régime, à partir des apports alimentaires en facteurs anti-nutritionnels tels que les phytates (Armah *et al.*, 2013; Miller *et al.*, 2013).

Sur le plan quantitatif, il existe cependant de légères différences d'apports en nutriments dans les régimes modélisés, selon que l'on baisse la viande totale ou uniquement la viande de ruminants. Tous sexes confondus, le fait de baisser totalement la viande (*versus* baisser uniquement la viande de ruminants) induirait des quantités inférieures de fer biodisponible (d'au plus -23%) et zinc biodisponibles (d'au plus -6%) tout du long des transitions, et de vitamine A (d'au plus -13%) à partir de l'étape de 70% de baisse. Pour la vitamine A par exemple, la différence s'explique en partie par le fait que dans les régimes sans viande de ruminants (où seules la viande rouge et la charcuterie ont diminué), les viandes résiduelles (volaille et viande de non-ruminants) contribuaient de 2 à 11% selon les sexes aux apports en vitamine A, la volaille étant la principale variable d'ajustement. Cependant, à la différence du fer et du zinc biodisponible, les quantités de vitamine A (en tenant compte de sa biodisponibilité) ont été maintenues supérieures ou égales aux valeurs de référence nutritionnelles dans tous les régimes modélisés et quelque soit le sexe.

9) *A contrario*, d'autres nutriments (protéines, vitamines du groupe B, et sélénium) auxquels la viande contribuait beaucoup dans les régimes observés auraient pu poser problème, mais ces nutriments n'étaient jamais limitants, c'est-à-dire que les quantités dans les régimes modélisés étaient strictement supérieures ou strictement inférieures aux valeurs de référence. Nos résultats viennent conforter l'hypothèse que l'adéquation des apports protéiques lors des transitions diététiques flexitariennes adoptées par une partie de la population générale dans les pays occidentaux n'est pas problématique (De Gavelle *et al.*, 2017). Dans cette thèse, les apports en acides aminés indispensables (AAI) dans les régimes modélisés étaient suffisants en quantité pour couvrir les besoins, y compris en fin de transition. Comme évoqué dans l'introduction bibliographique, des travaux antérieurs avaient déjà permis de conclure qu'une quantité suffisante de protéines garantissaient des quantités suffisantes d'AA (Katz *et al.*, 2019; Mariotti and Gardner, 2019; Young and Pellett, 1994).

Par ailleurs, le fait de baisser la viande totale (*versus* la viande de ruminants uniquement) induisait des apports supérieurs en iode d'au plus +7%, qui ont été apportés par une légère augmentation de la consommation de poissons (d'au plus +23%). Enfin, il est à noter que la vitamine B12 n'était jamais limitante quelle que soit la transition. Les produits laitiers étaient des contributeurs importants aux apports en vitamine B12 dans les scénarios à fortes réductions de la viande. Les teneurs moyennes en vitamine B12 des produits laitiers (pour 100g d'aliments consommés) étaient relativement faibles par rapport aux autres groupes alimentaires d'origine animale, mais les quantités consommées étaient élevées. Enfin, en ce qui concerne la vitamine D, nous n'avons pas fixé de contrainte inférieure, car la valeur de référence est connue pour être beaucoup trop élevée pour permettre une solution à partir de l'optimisation du régime alimentaire, étant donné que le régime alimentaire n'est pas la seule source de vitamine D de l'organisme (Mariotti *et al.*, 2021).

Les contraintes d'acceptabilité, qui bornaient les consommations aux 5^e et 95^e centiles de population, ont permis d'introduire dans le modèle l'hypothèse que des consommations inférieures aux 5^e centiles (P5) ou supérieures aux 95^e centiles (P95) ne sont pas acceptables sur le plan culturel. Ce choix de contrainte pour rendre compte de l'acceptabilité est évidemment discutable, puisque par exemple, des consommations au-delà du P95 peuvent être considérées comme acceptables sur le plan physiologique, et la question du maintien des P5 se pose particulièrement. A l'exception de quelques groupes alimentaires (pains raffinés,

ou encore produits gras et sucrés), le P5 était nul. Peut-on annuler la consommation sur le plan de l'acceptabilité culturelle ? Par ailleurs, dans le **projet n°2**, les seules contraintes d'acceptabilité limitantes aux étapes finales (régimes sans viande) chez les deux sexes étaient par construction les groupes alimentaires dont les consommations étaient maximisées comme objectif de santé (fruits, légumes et produits céréaliers complets), ainsi que le groupe alimentaire contenant les fruits de mer « Mollusques et crustacés ». Chez les deux sexes, ce groupe des fruits de mer étaient peu consommés dans l'étude INCA3 (P95 égaux à 26 et 28 g/j chez les femmes et les hommes, respectivement), alors que ce groupe est intéressant sur le plan nutritionnel, ce qui explique que la consommation des fruits de mer ait été limitante chez les deux sexes. D'après les aliments consommés dans INCA3 et les analyses du CIQUAL, nous avons analysé que ce groupe était à faible teneur en AGS, sucres et sodium, et à hautes teneurs relatives en vitamines B2 et B12, zinc, protéines, et sélénium. Un choix alternatif consisterait à remplacer la borne limitante par le 99^e centile (P99), afin d'ouvrir l'éventail des possibles et pour que cette contrainte n'empêche pas le rôle de levier diététique des fruits de mer. Cependant, le P99 ne représenterait que 5 individus sur nos échantillons sexués de ~500 individus, donc les P95 sont plus robustes statistiquement d'une part, et d'autre part, au-delà de la dimension de l'acceptabilité culturelle, des quantités en données de sortie déviant fortement des quantités initialement consommées augmenteraient *a priori* les coûts des régimes, notamment dans le cas des fruits de mer. Bien que les légumineuses étaient également peu consommées dans l'étude INCA3 (P95 égaux à 43 et 86 g/j chez les femmes et les hommes, respectivement), le critère d'acceptabilité n'a pas bridé toute augmentation potentielle de la consommation de légumineuses, puisque les contraintes n'étaient jamais limitantes chez les deux sexes. Autrement dit, les légumineuses n'ont donc pas eu un rôle de levier diététique dans les étapes à fortes réductions de la viande alors que l'intérêt nutritionnel des légumineuses est largement reconnu comme source de fibres, protéines, voire magnésium, outre son probable caractère protecteur vis-à-vis du risque cardiométabolique (Becerra-Tomás *et al.*, 2019; Viguiouk *et al.*, 2019). Néanmoins, ces résultats n'excluent pas que les légumineuses puissent devenir des leviers efficaces dans le cadre d'une étude sur des régimes encore plus végétaux (sans viande, mais également sans produits de la mer, ou encore sans produits laitiers).

d. Rapport protéines animales/protéines végétales dans le régime alimentaire

Comme nous l'avons vu dans l'introduction bibliographique, le rapport protéines animales/protéines végétales (rapport PA/PV) est à considérer dans les réflexions sur la durabilité des systèmes alimentaires (Clark *et al.*, 2019; Jarmul *et al.*, 2020; Katz *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2021), et l'identification de régimes alimentaires visant à englober les dimensions de santé humaine et planétaire (Kesse-Guyot, Rebouillat, *et al.*, 2021; Tuomisto, 2018; Willett *et al.*, 2019). L'intérêt actuel pour le rapport PA/PV dans l'alimentation découle notamment de l'association différentielle des protéines selon leur origine animale/végétale avec les pressions environnementales, et en particulier les émissions de GES (Clark *et al.*, 2019; Jarmul *et al.*, 2020; Katz *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2021). Cependant, nous avons également vu dans l'introduction bibliographique, qu'il convient de rester vigilant sur l'utilisation de ce rapport en tant que descripteur de la qualité du régime alimentaire, puisque deux régimes présentant le même rapport peuvent en fait être très différents (Richter *et al.*, 2015). Dans le cadre du **projet n°2**, nous avons voulu discuter les répercussions de la baisse de la viande totale sur l'évolution du rapport PA/PV dans les régimes modélisés à partir des régimes observés dans la population française. Pour chaque groupe alimentaire, les teneurs moyennes en protéines animales ou végétales ont été calculées pour 100g d'aliment moyen, à partir des teneurs en protéines par aliment, et en pondérant les teneurs de chaque aliment par la part représentée par sa consommation au sein du groupe (**Annexe 5**). Ces données ont permis de déterminer l'évolution du rapport PA/PV au cours de la trajectoire graduelle de diminution de la viande (**Tableau 13**).

- **Hommes**

	obs	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
% proteines_ani	67%	63%	63%	62%	60%	59%	56%	54%	51%	48%	46%
%proteines_veg	33%	37%	37%	38%	40%	41%	44%	46%	49%	52%	54%

- **Femmes**

	obs	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
% proteines_ani	65%	62%	62%	61%	59%	57%	56%	53%	51%	49%	47%
%proteines_veg	34%	38%	38%	39%	41%	43%	44%	47%	49%	51%	53%

Pourcentages de protéines animales (ou végétales) dans les régimes observés (obs) et modélisés tels qu'optimisés pour être plus sains en tenant compte de l'inertie alimentaire lors d'une transition graduelle vers des régimes contenant moins de viande, selon des contraintes progressives de réduction de la viande (10% à 100%) chez les hommes et les femmes (enquête INCA3, $n = 564$ hommes et $n = 561$ femmes). Dans chaque scénario modélisé de $x\%$, la consommation totale de viande a été diminuée d'au moins $x\%$ de sa valeur observée.

Tableau 13. Evolution du rapport protéines animales/protéines végétales au cours de la trajectoire graduelle de diminution de la viande

Globalement, les trajectoires de réduction de la viande décrites dans le **projet n°2** correspondaient bien à une végétalisation du point de vue protéique. Les proportions sont passées progressivement de 2/3 de protéines animales pour 1/3 de protéines végétales dans les régimes observés à 50/50 dans les régimes modélisés sans viande. En corollaire de cette analyse, un travail collaboratif déjà évoqué est présenté en **annexe 4**. Ce travail avait pour objet de déterminer plus largement les proportions entre les protéines végétales et animales dans les régimes alimentaires permettant de garantir la sécurité nutritionnelle et de minimiser les risques pour la santé à long terme.

II. Conclusion

Le travail de cette thèse a porté sur l'analyse des déterminants diététiques entre la consommation et la couverture des références nutritionnelles. Des analyses sur les perspectives de transition alimentaire d'une partie de la population française ont été menées en partant du principe d'une réduction de la consommation de viande, et en particulier de la viande de ruminants.

Le premier projet consistait à étudier si, et dans quelle mesure, les références actuelles en fer et en zinc biodisponibles limitaient l'identification de régimes sains. Peu de données étaient disponibles dans la littérature pour caractériser l'importance de ce conflit théorique attendu. La prise en compte de valeurs de référence plus faibles pour le fer et le zinc biodisponibles a permis d'identifier des régimes alimentaires présentant un avantage apparent plus important pour la santé de la population française, et nous avons vu que ces résultats peuvent être

extrapolés à la plupart des autres pays à haut revenus. Pour mieux évaluer le conflit que nous avons mis en évidence, cette augmentation modélisée de l'anémie ferriprive a été mise en balance avec les avantages attendus à long terme pour la santé qui résulteraient de l'adoption d'un régime alimentaire plus sain, ce qui pourrait aider notamment à raisonner les implications en termes de santé de l'établissement de la valeur de référence du fer.

Le second projet avait pour objet d'identifier des régimes optimisés obtenus avec des scénarios de réduction de la viande, afin d'analyser les freins nutritionnels et les leviers diététiques lors de ces transitions. Ces travaux ont notamment permis d'identifier des régimes conformes aux profils diététiques favorables à la santé, nutritionnellement sûrs, et préservant au mieux les habitudes de consommation, jalonnant des transitions alimentaires de baisse de la viande jusqu'à sa suppression. Au-delà de 50% de réduction, la volaille était largement majoritaire (50-80 g/j selon les sexes), et sa suppression ultérieure était moins efficace pour améliorer le profil diététique, mais un régime sain sans viande était atteignable chez les deux sexes. Les régimes modélisés correspondaient de nouveau à une situation de relâchement partiel des contraintes sur le fer et le zinc biodisponibles. Les conséquences sanitaires de ce relâchement étaient compensées par l'obtention de régimes globalement meilleurs pour la santé.

En dernier lieu, le troisième projet consistait à analyser les répercussions diététiques et nutritionnelles associées à des régimes modélisés, lorsque seule la viande de ruminants est réduite jusqu'à sa suppression. Les impacts de ces changements prospectifs ont ensuite été évalués selon des critères de durabilité environnementale. L'évaluation portait principalement sur les émissions de GES, mais également sur d'autres critères tels que la demande énergétique et l'épuisement des ressources en eau. La réduction de la viande de ruminants peut aboutir à des régimes alimentaires favorables à la santé et nutritionnellement adéquats, et alignés sur les réductions des émissions de GES.

III. Perspectives

Les résultats présentés dans cette thèse amènent à différentes pistes pour la poursuite de ces travaux. Il pourrait notamment être intéressant de mieux caractériser les relations entre la variété et la diversité des catégories alimentaires et la qualité de l'alimentation, ainsi que

d'analyser dans quelle mesure les nouveaux équilibres diététiques flexitariens et les trajectoires pour y parvenir dépendent des profils initiaux individuels de consommation et des caractéristiques (par exemple, socio-économiques) des consommateurs. Autrement dit, une question subsidiaire serait de comprendre dans quelle mesure les régimes prospectifs dépendent de la structure du régime initial du consommateur et de son répertoire alimentaire. Le travail de thèse pourrait également être approfondi en évaluant d'autres paramètres de durabilité. De manière plus générale, ces résultats pourraient être utiles pour raisonner des perspectives de changements alimentaires dit « flexitariennes » dans le cadre de la mise en œuvre des politiques publiques de l'alimentation.

a. Mieux caractériser les relations entre la variété et la diversité des catégories alimentaires et la qualité de l'alimentation

Les études modélisant des régimes adéquats, notamment par optimisation, utilisent les aliments à différents niveaux d'agrégation (items alimentaires, groupes alimentaires). Dans le cadre de cette thèse, nous avons choisi de modéliser les régimes alimentaires par des changements dans les consommations de groupes alimentaires qui ont été définis sur la base des niveaux de consommation et du répertoire alimentaire actuels (2014-2015) relatifs à la population française. Les régimes alimentaires ont été représentés à un niveau de détail suffisamment élevé, selon un regroupement des aliments facilement interprétable déjà utilisé par l'Anses dans le cadre de l'actualisation des repères de consommation français (Mariotti *et al.*, 2021). Le nombre de groupes alimentaires a fortement influencé le modèle en lissant les compositions moyennes en nutriments des groupes et en masquant toute spécificité nutritionnelle de certains items alimentaires au sein de chaque groupe (à un niveau plus détaillé). Par exemple, comme 2/3 des aliments composant le groupe « Poissons gras » étaient du saumon (saumon fumé, saumon cuit à la vapeur, rillettes de saumon, etc...), la composition en nutriments du saumon a eu un poids élevé dans le calcul de la composition moyenne en nutriments pour ce groupe, tandis que celle d'un autre aliment moins représenté tel que le foie de morue (notamment intéressant pour sa teneur en vitamine A, qui est ~400 fois plus élevée que celle du saumon) a été diluée. Il pourrait être intéressant d'étendre le nombre de groupes alimentaires, ou d'optimiser directement au niveau des items alimentaires afin de gagner en puissance et en champs des possibles. Il faudrait néanmoins contrôler le processus par ajout de contraintes afin de maintenir une diversité intra-catégorielle, et éviter d'avoir en

sortie une consommation très élevée d'un seul aliment. Nous pensons par ailleurs, que la modélisation à l'aide d'aliments standards/traditionnels constituait un bon point de départ pour évaluer la situation avant d'envisager des changements dans l'offre alimentaire, ou des changements dans la composition ou les processus alimentaires (par ex., aliments enrichis ou nouvelles sources alimentaires). Le regroupement des aliments joue un rôle essentiel dans la modélisation des régimes alimentaires (Mariotti *et al.*, 2021), alors que la diversité et la composition des aliments pourraient évoluer rapidement dans les pays occidentaux, comme le montrent les changements récents (Wickramasinghe *et al.*, 2021). Par exemple, on peut s'attendre à voir se développer dans les années à venir de nouveaux profils basés sur la consommation de substituts de viande, dont le marché se développe rapidement depuis quelques années (Hu *et al.*, 2019). La mise à jour des bases de données sur les aliments est un défi perpétuel pour répondre à l'augmentation rapide du nombre et de la variété des aliments dans l'approvisionnement alimentaire, à l'évolution des approches analytiques, et aux nouvelles pratiques et produits agricoles, comme le soulignent certains auteurs au sujet du centre du réseau d'informations sur la composition des aliments FoodData Central (FDC) du ministère américain de l'agriculture (USDA) (Fukagawa *et al.*, 2021).

b. Mieux caractériser la variabilité des habitudes alimentaires dans la population

Dans le cadre de cette thèse, toutes les optimisations de régimes ont été menées à l'échelle de la population. Dans les **projets n°1 à 3**, nous avons étudié une à deux transitions pour chaque sexe et dans une large tranche d'âge (18-54 ans pour les femmes, et 18-64 ans pour les hommes). Ainsi, nous avons utilisé des données assez récentes (2014-2015) et représentatives de la consommation alimentaire, mais avec une taille d'échantillon ($n = 1\ 125$) qui peut sembler faible. Une taille d'échantillon plus importante aurait été utile pour mieux caractériser la variabilité des habitudes alimentaires dans la population, mais puisque l'étude repose principalement sur des modifications de consommations moyennes en utilisant des modèles d'optimisation à partir de la moyenne des régimes observés, la taille de l'échantillon était suffisamment importante pour fournir une bonne précision pour des estimations au niveau de la population et pour effectuer des analyses nutritionnelles. En particulier, les apports en nutriments dans les régimes moyens observés ont été calculés sur la base des consommations de l'étude INCA3, qui utilisent trois rappels de 24 heures (**annexe 1**), ce qui offre une faible précision pour les estimations individuelles des apports en nutriments dont la

répartition est peu homogène au sein des régimes alimentaires individuels (par exemple, vitamines A et B12), mais offre une précision largement suffisante pour estimer la variabilité moyenne et inter-individuelle des apports dans une population pour la plupart des nutriments, y compris le fer et le zinc.

Cependant, à la lumière de nos travaux préalables, on s'attend à ce que la variabilité inter-individuelle influence la nature du régime optimisé, autrement dit, à ce que les régimes optimisés diffèrent selon les caractéristiques des consommateurs et leurs consommations. Des études plus détaillées pourraient prendre en compte des variations dans les régimes de départ observés provenant par exemple des caractéristiques socio-économiques de la population. En plus de l'identification de régimes optimisés, il serait intéressant de déterminer si les régimes optimisés diffèrent selon la structure alimentaire du régime initial des différents sous-groupes d'individus de la population hétérogène. La prise en compte de cette hétérogénéité serait probablement intéressante dans le cadre de l'étude des modalités de transitions alimentaires flexitariennes. En effet, des typologies apparaissent dans la population générale (Reuzé *et al.*, 2021). Par exemple, les attitudes des forts consommateurs de viande seraient différentes de celles des flexitariens et des pro-flexitariens (de Gavelle, Davidenko, *et al.*, 2019). Toutes les optimisations de régimes pourraient être menées à l'échelle individuelle ou sur des sous-populations, puis leurs résultats seraient statistiquement analysés selon le type de consommations prévalentes (par ex. étudiées par classification des consommateurs et/ou par analyse factorielle des consommations). Une approche abordant la problématique de la nutrition de précision, mêlant simulation et optimisation micro-diététique à l'échelle individuelle, serait davantage réaliste pour la prospective en la matière, quoique bien sûr beaucoup plus complexe et touffu. Ce volet de personnalisation est très peu abordé dans la littérature sur le sujet (Conrad *et al.*, 2017).

c. Etudier les trajectoires possibles de changements et leur variabilité selon les typologies de consommation existantes

Les **projets n°1 à 3** permettaient d'identifier des régimes cibles nutritionnellement adéquats et durables, mais ces régimes optimisés ne correspondaient pas nécessairement à des portions identifiables par les consommateurs. Par ailleurs, si ces études permettent d'identifier les régimes cibles, ils n'identifient pas les trajectoires ni la temporalité pour

effectuer les transitions des régimes observés vers les régimes optimisés. Dans une perspective de transfert applicatif, il s'avèrerait donc utile d'indiquer comment opérer les transitions flexitariennes en pratique, particulièrement si l'écart entre régime initial et optimisé est grand, en définissant des trajectoires de changement pour différents sous-groupes, c'est-à-dire des changements initiaux simples et acceptables qui permettent d'aller facilement et rapidement dans la bonne direction, à l'instar de travaux conduits préalablement (de Gavelle, Huneau, *et al.*, 2019; Verger *et al.*, 2014). Ces changements unitaires pourront être guidés par optimisation locale de l'adéquation nutritionnelle, mais plus vraisemblablement identifiés comme procédant de la trajectoire la plus courte vers l'optimum global défini par le régime. Cette approche fait actuellement l'objet de développements méthodologiques importants au sein de l'équipe d'accueil.

d. Prendre en compte d'autres paramètres de durabilité

Dans cette thèse, seule la qualité de l'alimentation (notamment, à travers le risque nutritionnel de morbi/mortalité, et le risque d'insuffisance d'apport), l'acceptabilité culturelle, les émissions de GES et d'autres indicateurs de pressions environnementales (demande énergétique, occupation des sols, et ressources en eau) ont été étudiés en contraintes, objectifs ou analyse d'impact. Or, l'alimentation a également un impact sur d'autres dimensions de durabilité environnementale (eutrophisation et acidification des sols, perte de biodiversité), et plus largement, sur d'autres paramètres de durabilité, comme l'exposition aux contaminants d'origine alimentaire ou le prix. Un autre volet sur les indicateurs de durabilité concerne l'équilibre entre les indicateurs liés à la santé (adéquation nutritionnelle ou morts prématurées évitées) et les autres indicateurs de durabilité (notamment les pressions environnementales et le prix), puisqu'aucune hiérarchisation n'est donnée dans la définition.

e. Les actions stratégiques pour améliorer la durabilité des régimes

Le travail de cette thèse est un travail scientifique qui se situe très en amont du processus d'évaluation puis d'élaboration des recommandations alimentaires visant à accompagner le changement d'attitude d'une partie de la population française. Dans ce contexte, nous finirons avec quelques considérations pour ouvrir la discussion au sujet des éventuelles implications de nos travaux vis-à-vis de la communication institutionnelle auprès des consommateurs sur

la durabilité des régimes alimentaires (Hung *et al.*, 2019). La question de la politique à adopter pour favoriser des pratiques de consommation durable se pose tout particulièrement en ce qui concerne la consommation de viande et des produits carnés. Les tendances présentées dans l'introduction bibliographique montrent une légère réduction de la consommation de viande pour un nombre significatif de consommateurs français (Agreste, 2020). Cependant à l'exception d'une minorité de consommateurs, l'éviction pure et simple de la viande ne semble pas se dessiner à l'avenir (de Gavelle, Davidenko, *et al.*, 2019; FranceAgrimer / IFOP, 2021). Les politiques de santé publique peuvent viser, soit un changement global de l'alimentation tel que le remplacement partiel de la viande par des légumes et légumineuses, soit des substitutions au sein d'une catégorie spécifique d'aliments comme la viande avec ses différentes variétés (volaille/viande rouge) ou ses différents segments de qualité (avec ou sans label). Le dynamisme des initiatives sur l'étiquetage et les applications numériques (type Yuka, Kwalito, Siga) confirme la forte demande d'information et de transparence des consommateurs (CNA, 2020). L'étiquetage devrait permettre de mieux identifier les produits issus des modes d'élevage les plus favorables (qualité des produits, bien-être animal, environnement). Par ailleurs, l'éducation et l'information sont deux piliers des politiques alimentaires, mais l'observation montre que ce sont les consommateurs déjà les mieux informés qui sont le plus à l'écoute des conseils (Batz *et al.*, 2016), et les personnes appartenant aux catégories sociales les plus modestes, qui consomment le plus de viande transformée, sont très souvent peu réceptives aux messages nutritionnels (Darmon and Drewnowski, 2008). Un renforcement de la diffusion des recommandations comme celles du PNNS peut s'effectuer *via* les réseaux sociaux, ou encore les écoles et cantines scolaires. Les recommandations et la publicité générique sont parfois utiles pour développer les connaissances et la sensibilité des consommateurs (Hung *et al.*, 2019), mais elles ne constituent généralement pas un levier efficace pour changer les comportements. Certains économistes ont évalué l'impact d'un instrument plus coercitif. Outre l'information, des incitations économiques (taxes et subventions) sont un autre moyen d'influencer les comportements de consommation, en renchérissant le coût d'acquisition des aliments dont on souhaite réduire la consommation, ou en soutenant l'achat de ceux que l'on veut promouvoir (WHO, 2021a; INRAE, 2020). Des travaux ont déterminé des niveaux de taxation sur la viande et mesuré leurs effets sur le déplacement des choix des consommateurs (Springmann, Mason-D'Croz, *et al.*, 2018). Enfin, d'autres actions cherchent à modifier

l'environnement d'achat ou le contexte de consommation afin d'orienter les consommateurs vers des options préférables. Par exemple, on peut jouer sur la taille des portions, les réduire notamment, et sur la diversité de l'offre dans les lieux de grande distribution.

Annexes

Annexe 1. Déroulé de l'étude INCA3 pour les participants

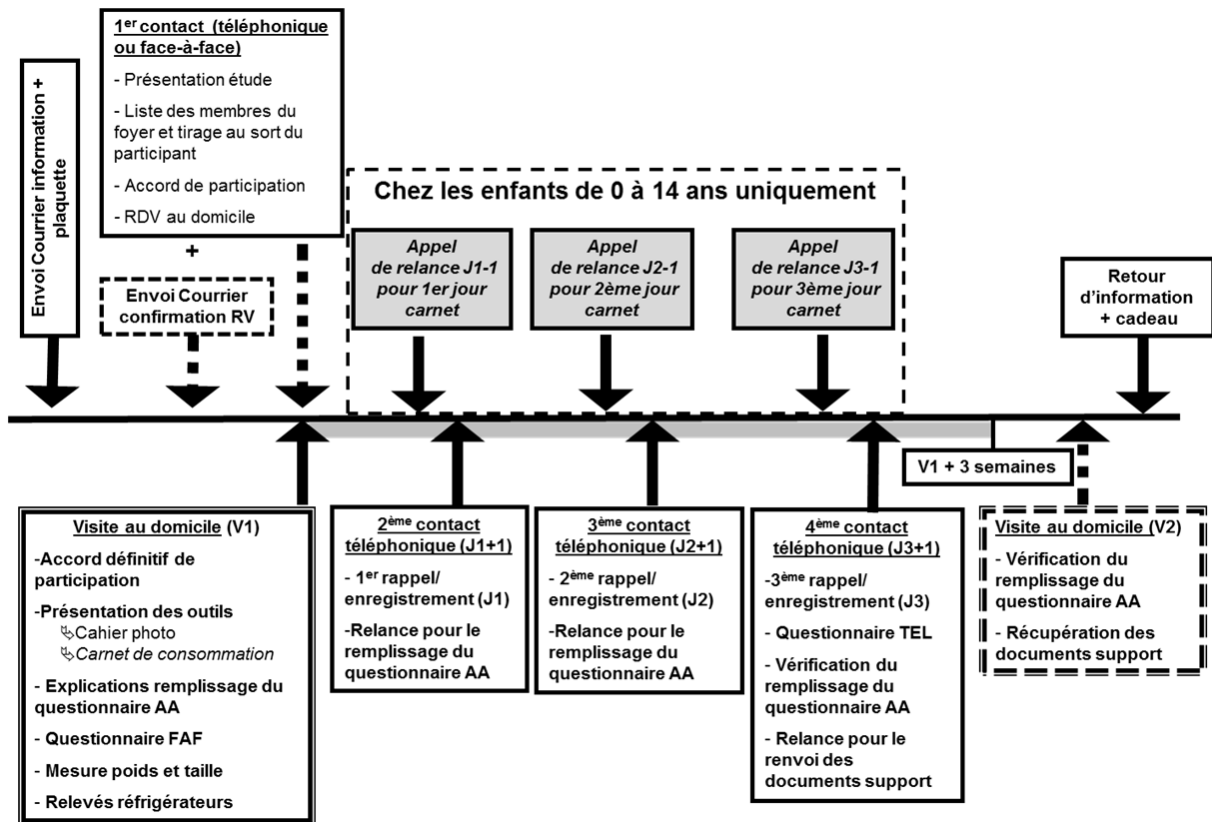


Figure 18. Mode opératoire de l'étude selon l'âge retenue pour le recueil des consommations alimentaires

(extrait du rapport de l'Anses relatif à l'étude INCA3, 2017, p.55)

Annexe 2. Résumé des groupes alimentaires formés pour la catégorisation des aliments dans le cadre de cette thèse

Familles d'aliments	Groupes alimentaires des projets n°1 et 2	Groupes alimentaires du projet n°3
Fruits et légumes	Légumes	
	Fruits frais	
	Fruits secs	
	Fruits transformés: compotes et fruits cuits	
	Noix, graines et fruits oléagineux	
Féculents	Pain et produits de panification raffinés	
	Pain et produits de panification complets et semi-complets	
	Autres féculents raffinés	
	Autres féculents complets et semi-complets	
	Produits à base d'amidon, transformés sucrés/gras	
	Produits à base d'amidon transformés salés/gras	
	Pommes de terre et autres tubercules	
Légumineuses	Légumineuses	
Viandes, charcuteries, produits de la pêche, Oeufs (VPO)	Volailles	
	Boeufs et veaux	
	Porcs et autres viandes	Porcs et autres viandes de non-ruminants
		Autres viandes de ruminants
	Abats	Abats de non-ruminants
		Abats de ruminants
	Charcuteries	Charcuteries de non-ruminants
		Charcuteries de ruminants
	Poissons gras	
	Poissons maigres	
	Mollusques et crustacés	
	Oeufs et plats à base d'Oeufs	
	Lait et produits laitiers	Lait
Produits laitiers frais nature		
Produits laitiers frais sucrés		
Desserts sucrés lactés		
Fromages		
Matières grasses ajoutées	Graisses animales et assimilés	
	Beurres et beurres allégés	
	Matières grasses végétales riches en ALA	
	Matières grasses végétales pauvres en ALA	
	Sauces et crèmes fraîches	
Produits sucrés ou Produits sucrés et gras	Produits sucrés ou Produits sucrés et gras	
Eaux de boisson	Eaux de boisson	
Boissons rafraîchissantes sans alcool (BRSA)	Boissons sucrées de type soda	
	Jus de fruits	
Boissons chaudes	Boissons chaudes	
Sel	Sel	

Condiments	Condiments
Herbes aromatiques, Epices (sauf sel)	Herbes aromatiques, Epices (sauf sel)
Soupes et Bouillons	Soupes
	Bouillons
Substituts de produits animaux	Substituts de produits animaux
Autres aliments	Autres aliments
Boissons alcoolisées	Boissons alcoolisées

Tableau 14. Nomenclature utilisée pour la classification des aliments présents dans la base

INCA3

Annexe 3. Incertitudes sur les données environnementales

Dans le **projet n°3**, nous avons évalué les niveaux des émissions de GES dans les régimes alimentaires observés puis dans les régimes modélisés par optimisation, à partir des consommations moyennes des adultes (18-64 ans) de l'étude INCA3 d'une part (Dubuisson *et al.*, 2019), et des données sur les émissions de GES par aliment de la base Agribalyse développée par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) complétée par la base SHARP d'autre part (ADEME, 2020; Mertens *et al.*, 2019). Par rapport aux régimes observés, les régimes modélisés sans viande de ruminants étaient associés à une réduction de ~30% des émissions de GES, tous sexes confondus. Tout récemment et de manière similaire, une étude d'optimisation a également été conduite en utilisant les données de la base Agribalyse, et les auteurs ont conclu que le remplacement des aliments d'origine animale dans les régimes actuels par des aliments nouveaux (spiruline, algues, insectes, etc...) permettrait de réduire tous les impacts environnementaux de plus de 80% tout en respectant les contraintes nutritionnelles et d'acceptabilité sur les consommations alimentaires. Dans cette étude, les nouveaux aliments sont ceux qui sont produits à partir de nouvelles technologies de production ou qui sont soumis à de nouveaux cadres réglementaires (Mazac *et al.*, 2022). En partant de niveaux élevés des émissions de GES dans les régimes alimentaires observés, nous nous serions attendus à une réduction plus importante dans les régimes modélisés que celle évaluée ici. La littérature disponible sur la modélisation des diminutions de viande (pas seulement de ruminants) montre globalement des effets sur les émissions de GES liées à la consommation alimentaire plus importants (Chai *et al.*, 2019; Ferrari *et al.*, 2020; Fresán and Sabaté, 2019; Grasso *et al.*, 2021; Kesse-Guyot, Fouillet, *et al.*, 2021; Perignon, Masset, *et al.*, 2016; Tyszler *et al.*, 2016).

Il peut y avoir plusieurs raisons à cela, et l'une d'entre elles est que nous avons évalué les effets environnementaux en analyse d'impact, contrairement à ces publications scientifiques, où la réduction des émissions de GES était directement un objectif ou une contrainte du modèle d'optimisation.

Une question corrolaire était de savoir si les données relatives aux émissions de GES par aliment dans la base Agribalyse (appliquées sur le cas français) pourraient être mieux estimées dans d'autres bases sur les émissions de GES pour différentes catégories d'aliments frais extraites des revues systématiques internationales (qui tiennent compte de différents modes

de production) (Clune *et al.*, 2017; Green *et al.*, 2015; Murakami and Livingstone, 2018). Pour savoir si les données relatives aux émissions de GES par aliment sont sur/sous-estimées dans les autres bases, nous avons examiné les données par aliment et les paramètres pris en compte dans la génération de ces données (conditions d'élevage, rôle du jeu des allocations) dans des publications antérieures, notamment les bases utilisées dans les études d'optimisation (Wilson *et al.*, 2019). Une analyse comparative a également été effectuée au niveau des régimes alimentaires, en utilisant les consommations dans les régimes observés et modélisés du **projet n°3**, et a montré une réduction légèrement atténuée des émissions de GES associées aux régimes modélisés aux étapes finales des transitions alimentaires (sans viande de ruminants) par rapport aux régimes observés en utilisant les bases de données internationales plutôt qu'Agribalyse (Erreur ! Source du renvoi introuvable.) (Green *et al.*, 2015; Murakami and Livingstone, 2018). Cette analyse comparative au niveau des régimes alimentaires ne permettait donc pas de confirmer l'hypothèse d'une surrestimation des valeurs des émissions de GES dans les bases internationales par rapport à la base française Agribalyse, mais mériterait d'être approfondie. Ces effets moins prononcés sur la réduction des émissions de GES peuvent en partie s'expliquer par le fait que les valeurs médianes des émissions de GES relatives à la viande bovine sont moins élevées que celles dans Agribalyse, lorsque le veau est regroupé avec le bœuf car la viande de veau, en raison de la durée de vie de l'animal, est associée à des valeurs moindres des émissions de GES par rapport à la viande de bœuf. De manière générale, les comparaisons au niveau des régimes alimentaires font défaut dans la littérature, et sont pourtant nécessaires pour comprendre pleinement les changements de pressions environnementales associés aux modifications des comportements alimentaires.

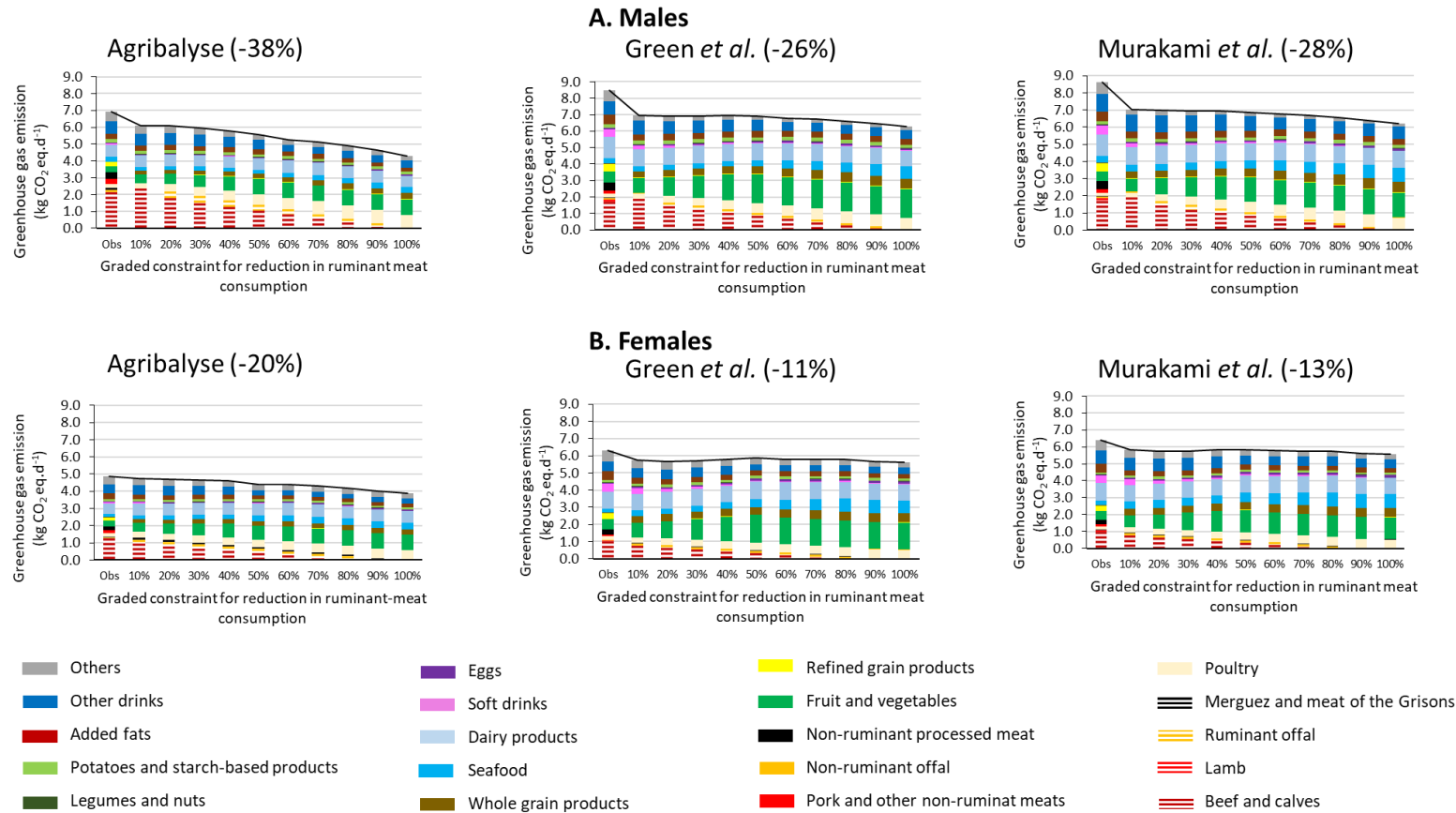


Figure 19. Analyse comparative des émissions de GES associées aux consommations alimentaires à partir des données de la base Agribalyse ou d'autres bases de données internationales chez les hommes (panneau A) et les femmes (panneau B) (enquête INCA3, $n = 564$ hommes et $n = 561$ femmes)

Annexe 4. Un large éventail de proportions entre les protéines végétales et animales dans le régime alimentaire peut garantir la sécurité nutritionnelle et minimiser les risques pour la santé à long terme

Dans un travail collaboratif sur l'évaluation du rééquilibrage entre produits animaux et végétaux, nous avons cherché à déterminer la fourchette de valeurs adéquates du pourcentage de protéines végétales (%PP) dans le régime alimentaire qui assurerait la sécurité nutritionnelle avec un risque minimal pour la santé à long terme. Ce premier problème d'identification de la gamme adéquate du %PP a été abordé par optimisation multi-critère hiérarchique (Mausser et al., 2006), selon un modèle d'optimisation très similaire à celui utilisé dans cette thèse, mais avec une contrainte supplémentaire sur le %PP qui a été paramétrée de manière itérative selon une grille de recherche. L'une des principales conclusions a été qu'il n'y a pas de valeur optimale du %PP puisque nous avons trouvé un spectre de régimes alimentaires sains similaires dans la fourchette de 25% à 70% du %PP. Toutefois, il convient de noter que les régimes situés dans la partie supérieure de la fourchette (en modélisant une augmentation progressive des protéines végétales) ont été associés à des émissions de GES et à des pressions environnementales globales nettement inférieures. Par ailleurs, des régimes avec un %PP > ~80% fourniraient des quantités insuffisantes pour un grand nombre de nutriments, notamment l'iode, la vitamine B12 (chez les hommes), le fer biodisponible (chez les femmes), le calcium et l'EPA+DHA. Même en supprimant toutes les contraintes d'acceptabilité limitant les consommations alimentaires aux gammes observées (comme nous l'avons testé dans une analyse de sensibilité), il restait impossible d'obtenir des régimes 100% végétal en raison des mêmes problèmes nutritionnels (apports insuffisants en vitamine B12, iode et EPA+DHA). Nos résultats ne doivent pas directement signifier que les régimes végétariens (sans viande, ni poisson) ou végétaliens (sans viande, ni poisson, ni lait, ni œufs) ne peuvent pas être nutritionnellement adéquats dans d'autres contextes, par exemple en étendant le répertoire alimentaire à des nouveaux aliments tels que les analogues végétaux ou à des aliments enrichis. Cela justifie d'autres études sur le potentiel des nouveaux aliments à étendre la limite de la fourchette du %PP identifiée comme adéquate ici.

Plant to animal protein ratio in the diet: nutrient adequacy, long-term health and environmental pressure

Hélène Fouillet^{1*}, Alison Dussiot¹, Elie Perraud¹, Juhui Wang¹, Jean-François Huneau¹, Emmanuelle Kesse-Guyot², François Mariotti¹

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

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

*Address correspondence to Dr. Helene Fouillet, helene.fouillet@agroparistech.fr or Prof. François Mariotti, francois.mariotti@agroparistech.fr.

Sources of support: The authors report that no funding was received for this study.

Author disclosures: HF has received a research grant by INRAE from Roquette. FM has received research grants as PhD fellowships under his direction by AgroParisTech and INRAE from Terres Univia and Ecotone foundation, under the aegis of Fondation de France.

Availability Statement: Data described in the manuscript, code book, and analytic code will be made available upon request pending application and approval.

3 Figures, 2 Tables

16 Supplementary Data (2 Supplemental Methods, 8 Supplemental Tables, 6 Supplemental Figures)

Running title: Diet plant to animal protein ratio

Abbreviations used: ANSES, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health and Safety; CIQUAL, French Information Centre on Food Quality; DALYs, Disability-adjusted life-years; *DD*, Diet departure criterion; GDB, Global Burden of Diseases; GHGe, greenhouse gas emissions; *HR*, Health risk criterion; INCA3, Third Individual and National Study on Food Consumption French Survey; %PP, Percentage of plant protein in the diet; TMREL, Theoretical minimum risk exposure level.

1 **Abstract**

2 Animal and plant protein sources have contrasting relationships with nutrient adequacy and
3 long-term health, and their adequate ratio is highly debated. Using reference values for
4 nutrients and disease burden risks for foods, we modeled diets with graded plant protein
5 proportions (%PP) that ensure nutrient adequacy, minimize long-term health risks and best
6 preserve dietary habits in French adults. We furthermore estimated the diets' related
7 environmental impacts. We demonstrated that nutrient-adequate diets must fall within the
8 15%-80% %PP range, and that fully healthy diets additionally achieving the minimum-risk
9 exposure levels for unhealthy/healthy foods must fall within the 25%-70% %PP range. All
10 healthy diets were very distant from current typical diet, and those with higher %PP
11 contributed less to climate change and land use. There is thus no single optimal %PP when
12 considering only nutrition and health, but high %PP diets are more sustainable. For
13 %PP>80%, nutrient fortification/supplementation and/or new foods are required.

14 **Keywords:** Plant-based diets; Healthy dietary patterns; Nutrient adequacy; Environmental
15 footprints; Diet optimization

16 **Introduction**

17 Historical and current nutritional transitions are coupled with changes in the relative
18 contribution of dietary animal and plant proteins. This has been studied from hunter-gatherers
19 to post-agricultural societies ¹, from traditional diets that enabled thriving civilizations to diets
20 in post-industrialized countries ^{2,3}, and more recently, in western countries with the emerging
21 trend toward more plant-predominant diets.

22 Changes in plant and animal protein intake raise classic nutritional questions. One in
23 particular concerns the possible risk of deficiency with diets too low in animal protein, since
24 animal protein foods contribute significantly to the intake of indispensable nutrients ⁴.
25 However, plant proteins are also important for the intake of some indispensable nutrients and
26 fiber, and are also lower in saturated fats ⁵. Beyond the relationship to nutrient adequacy,
27 animal/plant proteins and their packages largely affect the metabolome and the microbiota
28 and physiological functions that are crucial for long-term health ⁵⁻⁸. Accordingly, there have
29 been many contrasting associations reported recently between plant and animal protein
30 intake and mortality, especially regarding cardiovascular diseases ^{5,9,10}.

31 More globally, plant (such as legumes, nuts and whole grains) and animal (such as red and
32 processed meats) protein sources have heterogeneous relationships to nutrient adequacy ¹¹
33 and to long-term health regarding cardiovascular diseases ^{7,12-14} and cancers ^{15,16}. There is
34 indeed a challenge for food-based dietary guidelines to point out what proportions of plant
35 and animal protein foods should be recommended ^{17,18}. However, the plant to animal protein
36 ratio remains a poor, summarizing descriptor of dietary patterns, since two diets with the
37 same plant to animal protein ratio can actually be very different ⁷. There is thus a need to

38 analyze the overall proportion of plant protein in the diet in view of the related dietary profiles
39 and their nutritional adequacy and healthiness.

40 Furthermore, current interest in the proportions of plant and animal proteins in the diet also
41 stems from their differential association with environmental pressures, in particular
42 greenhouse gas emissions (GHGe) and land use ¹⁹⁻²². Altogether, the plant to animal
43 protein ratio in the diet appears central to the sustainability of the food systems ^{19,23}. This
44 has implications for dietary guidelines that aim to encompass both human and planetary
45 health ²⁴⁻²⁶.

46 Here, using advanced diet modeling and optimization, we studied whether an optimal
47 proportion of plant protein in the diet (%PP, the percentage of plant protein in total protein
48 intake) can be identified when taking into account the reference values for nutrients and the
49 disease burden risks for food categories. We characterized modeled diets that departed as
50 little as possible from prevailing diets at all levels of adequate %PP values for nutrient
51 adequacy and long-term health to identify nutritional issues (i.e., limiting nutrients) and dietary
52 levers (i.e., effective foods). We furthermore estimated the environmental pressures
53 associated with modeled diets along the whole range of adequate %PP values.

54 **Results**

55 Range of adequate %PP values and identified tensions between %PP, nutrient adequacy 56 and long-term health

57 The adequate %PP range compatible with nutrient adequacy was 16%-82% in males and
58 16%-77% in females, and only the 25%-70% %PP range was additionally compatible with a
59 minimal health risk for both sexes (**Table 1**). In this narrower range, a null *Health Risk* criterion
60 (*HR*) value was attained by the removal of unhealthy foods (red meat, processed meat and
61 sweetened beverages) and an increase in healthy foods (whole grain products, fruits,
62 vegetables, legumes, nuts and seeds, and milk) up to or above their theoretical minimum risk
63 exposure levels (TMREL) ²⁷.

64 Among the %PP equality constraint and the nutritional constraints, none were found limiting
65 for *HR* minimization over the 25%-70% %PP range (**Table 2**). The %PP equality constraint
66 was limiting only for %PP values lower than 25% (strongly) and higher than 70% (more
67 moderately, due to the lower *HR* impact of the milk decrease for the highest %PP values than
68 of the red meat increase and whole grain product decrease for the lowest %PP values).
69 Nutrients identified as increasingly limiting as %PP decreased below 25% were fiber, sugar
70 (excluding lactose), saturated fatty acids and atherogenic fatty acids (lauric, myristic and
71 palmitic acids). As %PP decreased below 25%, it was hence increasingly challenging to
72 maintain sufficient intake of fiber and non-excessive intakes of sugar and fatty acids (as
73 shown by the opposite sign of their dual values), which resulted in dietary solutions of
74 increasingly degraded *HR* values. Nutrients that were identified as increasingly limiting when
75 %PP increased above 70% were iodine, sodium, vitamin B2, calcium, EPA+DHA, vitamin A
76 and α -linolenic acid in both sexes together with vitamin B12 in males and bioavailable iron in

77 females. As %PP increased above 70%, it was increasingly challenging to maintain
78 sufficient intakes of these nutrients and a non-excessive sodium intake. The other nutrients
79 (n=20, those not shown in Table 2) were never limiting over the adequate %PP range,
80 including, of note, protein.

81 Sensitivity analysis showed that being more demanding for bioavailable iron and zinc (i.e.,
82 constraining their deficiency prevalence at $\leq 1\%$ rather than $\leq 5\%$ as in the main model)
83 resulted in slightly restricting the adequate %PP range on the right (16%-79% in males and
84 16%-70% in females), and the %PP range ensuring a null *HR* value on both sides (30%-65%
85 in males and 35%-45% in females) (data not shown). Conversely, when suppressing all the
86 food group consumption limits (i.e., all the dietary and acceptability constraints) from the
87 model (Supplemental Table 1), the range of adequate %PP values was expanded on both
88 sides (8%-94% in males and 8%-92% in females), as was the %PP range ensuring a null *HR*
89 value (16%-86% in males and 16%-84% in females), but consistently with the same limiting
90 nutrients as in the main model (in particular, insufficient fiber intake for excessively low %PP
91 values, or insufficient intakes of vitamin B12, iodine and EPA+DHA for excessively high %PP
92 values).

93 Modeled diets

94 All the modeled diets identified (**Figure 1** and Supplemental Figure 1) were very distant from
95 the current typical French diets, with *Diet Departure (DD)* values equal to or greater than
96 twice the standard deviation observed in the population. Furthermore, most of the modeled
97 diets with a null *HR* value (i.e., in the 25%-70% %PP range) were all about equally distant
98 from the observed diets, with close *DD* values (differing by less than 20%) in the 35%-65%
99 %PP range and similar *DD* values (differing by less than 5%) in the 45%-60% %PP range.

100 Although the energy intake remained relatively stable between modeled and observed diets
101 (by construction), the total intakes of both animal-based and plant-based foods were
102 increased in the 25%-70% %PP range, notably owing to the important increases in milk, fruits
103 and vegetables up to or above their TMREL values (Supplemental Table 2 and Supplemental
104 Figure 2). Regarding plant products, all the modeled diets exhibited dramatic increases in
105 fruits and vegetables, whole grain products and legumes and nuts. Regarding animal
106 products, red and processed meats were readily removed as %PP increased. These meats
107 were replaced by poultry and eggs, which transiently increased, the modeled diets then being
108 meat-free from PP%=60%. Dairy and seafood were the only remaining animal products at
109 the right end of the adequate %PP range (Supplemental Figure 2).

110 Over the entire adequate %PP range, including meat-free diets, the intakes of protein and of
111 each indispensable amino acid were always much higher than their 98% safe intake
112 thresholds (**Figure 2** and Supplemental Table 3 and Supplemental Figure 3).

113 Contributions of food groups to limiting nutrient intakes

114 Regardless of their %PP value, all the modeled diets were nutrient-adequate, in contrast with
115 observed diets (Supplemental Table 4).

116 As %PP increased, it was increasingly difficult to maintain sufficient intakes of bioavailable
117 iron, vitamins B12, B2 and A, and iodine and calcium, owing to the decreases in the animal
118 products that were their main contributors (red meat, dairy products and eggs) (Supplemental
119 Figure 4). The EPA+DHA and α -linolenic acid intakes, which are largely insufficient in the
120 observed diets, were made sufficient in all the modeled diets by increases in their main
121 contributors, respectively, seafood and added fats, with difficulties to maintain them sufficient
122 for the highest %PP values (Supplemental Figure 4). The sodium intake, which is dramatically

123 excessive in the observed diets, was reduced to its upper limit in all the modeled diets as a
124 result of removing processed meat and reducing refined grain products, with difficulties to
125 maintain sodium not excessive for the highest %PP values, due to increases in some starch
126 and miscellaneous foods (Supplemental Figure 4). Conversely, as %PP decreased, it was
127 increasingly difficult to maintain a sufficient intake of fiber and non-excessive intakes of sugar
128 and saturated fatty acids, due to the meat and dairy increases (Supplemental Figure 5).

129 Environmental impacts of modeled diets

130 Across modeled diets, GHGe gradually decreased as %PP increased, with a stagnation from
131 %PP=70% onwards, from which the GHGe were 43% lower than with the observed diet
132 (**Figure 3**). Similar trends were observed for land use and, to a lesser extent, fossil resource
133 use (Supplemental Figure 6), with 43% and 12% decreases, respectively, from the observed
134 to the modeled diet with %PP=70%. In contrast, water use was similarly ~40% higher for all
135 the modeled diets, regardless of their %PP value, than for the observed diet, due to their very
136 high levels of fruits and vegetables that were by far the most water-demanding food groups
137 (Supplemental Figure 6). Overall, at the level of the single environmental footprint score that
138 aggregated 16 indicators, the same trend was observed as for GHGe, with a 34% decrease
139 in this aggregated score from the observed to the modeled diet with %PP=70%
140 (Supplemental Figure 6).

141 Discussion

142 Gathering all nutritional information over a large spectrum that covered nutrient reference
143 values and long-term health risks, our study formally establishes ranges of plant protein
144 proportion (%PP) for nutrient-adequate and healthy diets. One major finding is that there is
145 no optimal %PP value, as we found a spectrum of similarly healthy diets over the 25%-70%
146 range. However, diets in the upper end were associated with substantially lower GHGe and
147 overall environmental impact.

148 A wide dietary %PP range, from ~15% to 80%, was found compatible with providing all
149 nutrients in adequate amounts. As shown by sensitivity analysis, this %PP range was slightly
150 restrained by the considered constraints for food acceptability, whereas the nutritional issues
151 identified remained broadly the same with or without these constraints. From a nutritional
152 viewpoint, no diet with %PP < ~15% was able to provide enough fiber and non-excessive
153 amounts of saturated fatty acids, while also satisfying all constraints for nutrient intakes and
154 food acceptability. More interestingly, given the ongoing dietary transition, we could not find
155 diets with %PP > ~80% that would provide sufficient amounts of a large set of nutrients,
156 particularly iodine, vitamin B12 (in males), bioavailable iron (in females), calcium and
157 EPA+DHA. These nutrients are considered to be at issue in vegetarian diets (except calcium
158 and iodine in lacto-ovo-vegetarian), notably calcium and B12 in predominantly plant-based
159 diets ^{28,29}. From a dietary viewpoint, as shown when approaching the critical value of
160 %PP=80%, dairy appeared to be key to preventing iodine and calcium shortages. Seafood,
161 meanwhile, appeared critical to providing EPA+DHA (with oily fishes as the main source) as
162 well as iodine and B12. Milk and seafood were the last remaining animal products at the
163 highest %PP values, confirming their importance as healthy, nutrient-dense protein sources
164 ³⁰. Healthy plant protein sources such as legumes and nuts apparently could not replace milk

165 or seafood. This is because they actually reached their upper allowed intake very early (as
166 soon as %PP=25% for legumes), which indicates that they constitute an effective dietary
167 lever. However, even when removing all food intake limits (in sensitivity analysis), it remained
168 impossible to obtain 100% plant-based diets because of the same nutritional issues
169 (insufficient intakes of vitamin B12, iodine and EPA+DHA). Our findings do not indicate that
170 vegetarian (without seafood) or vegan diets (without seafood and dairy) cannot be
171 nutritionally adequate. It means that solutions for diets that are entirely or almost entirely
172 plant-based should rely on additional food products than those presently consumed by the
173 general population, including fortified foods ³¹⁻³³. This warrants further studies about the
174 potential of new foods to extend the limit of the %PP range identified as adequate here.

175 Within the wide range of nutrient-adequate %PP values, we did not find a single optimal diet,
176 but a large range of diets with %PP from 25% to 70%. These diets were all optimal when
177 considering their health value, because their food consumptions complied with minimum-risk
178 exposure levels. These consisted of no red meat and high levels of fruits and vegetables,
179 whole grains, legumes, nuts and milk, in line with dietary guidelines ³⁴. Modeled healthy diets
180 were variations of this pattern, which explains why they were also similarly distant from
181 current diets. Within this healthy pattern spectrum, the increase in %PP was predominantly
182 related to the decrease in total and animal proteins. This occurred mostly in poultry and eggs
183 and, to a lesser extent, dairy. This finding aligns well with the current spectrum of observed
184 diets, with plant-based diets being higher in plant protein but especially low in total and animal
185 protein ^{35,36}. This could simply be ascribed to the higher protein density in animal protein
186 sources compared to plant protein sources. Also, the nutrients identified as limiting at the
187 borders of the healthy %PP range appear to be related to the nutrient density of animal vs
188 plant protein sources when expressed relative to protein density. However, the dietary protein

189 amount was never limiting, even at the highest %PP levels. There is a growing consensus
190 that the protein package and not the protein per se are important to the question of plant to
191 animal protein ratio in the diet ^{5,7}. Likewise, indispensable amino acid amounts were well
192 above reference values based on requirements. In real diets, composed of a mix of different
193 types of proteins that complement each other, sufficient amounts of protein appear to
194 guarantee sufficient amounts of amino acids ^{20,36,37}.

195 Distance from the prevailing diets is often used in diet modeling to take into account so-called
196 cultural acceptability ³⁸⁻⁴⁰, also referred to as dietary inertia ⁴¹. In this study, healthy diets in
197 the 35-65% %PP range departed rather similarly from the prevailing diets, which are still at
198 ~35% %PP. This confirms that the plant to animal protein ratio is, by itself, a poor descriptor
199 of diet characteristics, and so blanket statements about the right %PP are not warranted.
200 Given that modeled healthy diets ranging from 35% %PP (the level of the current diets in
201 western countries) to 65% %PP were all very distant from current diets, our study also shows
202 that overcoming dietary inertia is required for healthy diets, irrespective of the plant to animal
203 protein target ratio ⁴².

204 The GHGe and overall composite score for environmental pressures were lower for healthy
205 modeled diets than observed diets, and all the more as %PP increased. A large body of
206 literature has reported that diets which are more plant-based are associated with lower
207 environmental pressure, and vice versa, whether diets were modeled ^{29,40,43,44}, observed ⁴⁵⁻
208 ⁴⁷ or composite ²³. However, until our study, this relationship had not yet been demonstrated
209 using %PP in healthy diets; our results indicate that %PP is strongly associated with the
210 environmental impact of healthy diets. As compared to the prevailing diets, lower GHGe and
211 composite score are firstly explained by the removal of total red meat in all healthy diets, red
212 meat accounting for ~1/3 of the pressure in prevailing diets. This is in line with the literature

213 that points to red meat and associated sustainability concerns ^{44,48}. Finally, we found that
214 other environmental pressures (land use and fossil resource use), except water use, had
215 similar patterns of change, in line with the literature ^{19,29}. The strong general relationship
216 between %PP and environmental pressure can mostly be ascribed to the fact that animal
217 sources are rich in protein, and that livestock breeding is associated with higher resource
218 use, higher land use, and higher GHGe ^{21,49-51}.

219 This study has some limitations. We modeled diets according to changes in intakes of food
220 groups, based on the present food repertoire and current intake levels in the population. Food
221 grouping is critical in diet modeling ⁵², and food diversity and composition can change rapidly
222 in western countries, as seen by recent changes ⁵³. A similar limitation applies to the
223 assessment of a diet's environmental impacts, for which also we did not consider variations
224 related to food production systems ^{54,55}. Nevertheless, we used a classical food grouping,
225 which helps represent dietary patterns at an appropriately high level of detail. We also believe
226 that using standard/traditional foods in modeling provides a good starting point to evaluate
227 the situation before considering changes in the food offer or food composition. Our study
228 uses sources of information as background parameters, including references/targets for
229 nutrients and food categories. Clearly, there are many uncertainties in this regard ⁵².
230 Nonetheless, we believe that a strength of our study is our use of a conceptual framework
231 that aggregates most of the state of the art knowledge in nutrition.

232 To conclude, we identified that the range of equally optimal %PP values for nutrition and
233 health is wide (25%-70%), and that all of these healthy diets deviate greatly from prevailing
234 diets. From a public health perspective, there is no unique, optimal %PP value when
235 considering nutrition and health alone. However, significant changes in current eating habits
236 are nonetheless required to achieve healthier diets. Moreover, in the higher end of the plant

237 protein percentage range, modeled healthy diets have a lower environmental impact and are
238 thus more sustainable than other healthy diets. At %PP > ~80%, changes in food repertoire
239 diversity, food composition, nutrient enrichment or nutrient supplementation are required for
240 fully nutrient-adequate diets.

241 **Methods**

242 Input of dietary data

243 The data used for this study were extracted from the French Individual and National Study
244 on Food Consumption Survey 3 (INCA3) conducted in 2014-2015. The INCA3 survey is a
245 representative cross-sectional survey of the French population; its method and design have
246 been fully described elsewhere ⁵⁶. Males aged 18-64 y (*n*=564) and pre-menopausal females
247 aged 18-54 y (*n*=561), not identified as under-reporters, were included in the present study;
248 the final sample contained 1125 adults.

249 Dietary data were collected by professional investigators assisted by a dietary software from
250 three unplanned, non-consecutive, 24h dietary recalls spread over a three-week period.
251 Portion sizes were estimated using validated photographs ⁵⁶, and the nutrient contents of
252 different food items came from the 2016 food composition database operated by the French
253 Information Centre on Food Quality (CIQUAL) ⁵⁷. Mixed foods were broken down into
254 ingredients and then gathered into 45 food groups (Supplemental Table 5). For each sex, the
255 nutrient content of each food group was calculated as the mean nutrient content of food items
256 constituting the food group weighted by their mean intake by the sex considered, as
257 previously described ⁵⁸.

258 Multi-criteria diet optimization under constraints

259 Using multi-criteria optimization, we identified modeled diets (i.e., modeled consumptions of
260 the 45 food groups) with a minimal long-term health risk and a minimal departure from the
261 observed diet (taking into account cultural acceptability and inertia), under constraints that
262 would ensure adequate nutrient intakes and remain within current consumption limits. In this

263 context, we investigated the role of %PP to identify its adequate range of variations and to
264 characterize the dietary, nutritional and environmental consequences of these variations.

265 This non-linear optimization problem was performed using the NLP solver of the OPTMODEL
266 procedure of SAS software version 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.). Optimization
267 was implemented at the population level but in males and females, separately. The optimized
268 diets of males and females were then averaged to derive optimized diets for the adult
269 population.

270 Constraints

271 During diet optimization, the total energy intake was constrained to stay within $\pm 5\%$ of its
272 observed value. Thirty-five nutritional constraints were applied to ensure adequate nutrient
273 intake in the male and female populations (Supplemental Table 6), based on the most recent
274 reference values from the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health
275 & Safety (ANSES)⁵⁹. We did not consider any constraints for vitamin D, because its reference
276 value is known to be much too high to be reached by a non-fortified diet alone^{52,58}. As the
277 absorption of iron and zinc is dependent on dietary factors, the requirements were based on
278 bioavailable iron and zinc calculated from the dietary intake using equations that predict their
279 absorption⁶⁰⁻⁶², as detailed in a previous study by our group⁵⁸. This previous study had
280 demonstrated that current recommendations regarding bioavailable iron and zinc are very
281 constraining when trying to model healthier diets, these recommendations being much higher
282 than current intakes (e.g., there is a current iron-deficiency anemia prevalence of 4.1% in
283 French women)⁵⁸. Therefore, like in this previous study, we used threshold values lower than
284 current reference values. They correspond to a deficiency prevalence of 5%, because such
285 flexibility enables the identification of diets that are apparently healthier overall, with a better

286 balance in disability-adjusted life-years (DALYs) due to less cardiometabolic disease, despite
287 a higher prevalence of iron-deficiency anemia ⁵⁸. In addition, to take into account the slightly
288 lower digestibility of plant vs animal proteins regarding the nutritional constraint on protein
289 requirement, a 5% penalty was applied to protein intake from plant protein food items, as
290 previously described ⁶³. As the intake of individual amino acids is generally adequate when
291 the protein intake is sufficient in a varied diet ⁶⁴, only protein requirements were considered
292 in the model constraints, but we have *a posteriori* verified that modeled diets also contained
293 adequate intakes of indispensable amino acids by using a database of the amino acid
294 composition of food groups (Supplemental Method 1).

295 Moreover, some acceptability constraints were applied to the food group consumption
296 (Supplemental Table 7). Acceptability constraints aimed to keep the food group intakes within
297 the range of observed intakes, by bounding each food group intake between its 5th and 95th
298 percentile of observed consumption in males and females separately. We did not do this for
299 the unhealthy food groups or categories (red meat, processed meat and sweetened
300 beverages), for which a dietary constraint with an upper limit was already defined according
301 to the French dietary guidelines. Another exception was made for some healthy food groups
302 (legumes and milk) that had 95th percentile values slightly lower than TMREL values, and for
303 which the upper limit has thus been raised to their TMREL values.

304 Objectives

305 The main optimization objective was to minimize the long-term health risk of the modeled
306 diet, as assessed by the *HR* criterion. The *HR* criterion was set to target the dietary
307 recommendations from the GDB based on epidemiological studies about the associations
308 between consumption of different food groups and risk of chronic diseases ²⁷. The *HR*

309 criterion thus aimed to limit the consumption of three unhealthy food groups or categories
 310 (red meat, processed meat and sweetened beverages), while promoting that of six healthy
 311 food groups or categories (whole grain products, fruits, vegetables, legumes, nuts and seeds,
 312 and milk) until their TMREL values were reached. According to the most recent (2019)
 313 estimates from the Global Burden of Diseases (GBD), TMREL values were 0 g/d for red meat,
 314 processed meat and sweetened beverages, and 150, 325, 300, 95, 14.5 and 430 g/d,
 315 respectively, for whole grain products, fruits, vegetables, legumes, nuts and seeds, and milk
 316 ²⁷. In our study, the *HR* criterion was thus expressed and minimized as:

$$317 \quad \text{Min } HR = \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\text{Opt}(i)}{\text{Max}(i)} \times \frac{\text{DALYs}(i)}{\text{DALYs}(\text{all})} \right) + \sum_{j=1}^6 \left(\max \left[\frac{\text{TMREL}(j) - \text{Opt}(j)}{\text{TMREL}(j)}; 0 \right] \times \frac{\text{DALYs}(j)}{\text{DALYs}(\text{all})} \right)$$

318 Where *i* denotes the food groups to be decreased (red meat, processed meat and sweetened
 319 beverages), *j* denotes the food groups to be increased (whole grain products, fruits,
 320 vegetables, legumes, nuts and seeds, and milk), *Opt*(*i*) and *Opt*(*j*) are the optimized
 321 consumptions of food groups *i* and *j*, respectively (in g/d), *Max*(*i*) is the upper limit of
 322 consumption of food group *i* (in g/d), *TMREL*(*j*) is the *TMREL* value of food group *j* (in g/d),
 323 *DALYs*(*i*) and *DALYs*(*j*) are the disability-adjusted life-years associated with excessive or
 324 insufficient consumptions of food groups *i* and *j*, respectively (in y), and *DALYs*(all) is the sum
 325 of all *DALYs*(*i*) and *DALYs*(*j*). The *Max* values used were the maximal recommended
 326 consumption of unhealthy foods in line with the French dietary guidelines ⁵²: 71g/d for red
 327 meat, 25g/d for processed meat and 263 g/d (corresponding to the average portion size) for
 328 sweetened beverages intake. The *TMREL* and *DALYs* values used were issued from the
 329 most recent (2019) estimates from the GBD ²⁷ adapted to our study context (by using sex-
 330 specific and French *DALYs* values, Supplemental Table 8).

331 We also evaluated how the modeled diets deviated from current diets (*DD* criterion), in order
332 to consider inertia to changes in food consumption, which is one way to account for
333 social/cultural acceptability. The *DD* criterion was defined as the sum of the squares of the
334 differences between observed and optimized food group consumption, standardized by their
335 observed standard deviations, as previously explained ⁵⁸. *DD* was thus expressed and
336 minimized as:

$$337 \quad \text{Min } DD = \sum_{k=1}^n \left[\frac{\text{Obs}(k) - \text{Opt}(k)}{\text{SD}(k)} \right]^2$$

338 Where *k* is the number of food groups (*n*=45), *Obs*(*k*) and *Opt*(*k*) are respectively the
339 observed and optimized consumption of food group *k* (in g/d) and *SD*(*k*) is the current
340 standard deviation of the consumption of food group *k*.

341 Optimization strategy

342 We firstly aimed to determine the range of adequate %PP values in the diet that would ensure
343 nutrient adequacy with a minimal long-term health risk. This first problem of identifying the
344 adequate %PP range was addressed by optimizing the *HR* criterion under all the nutritional
345 and acceptability constraints, with an additional constraint on %PP that was iteratively
346 parameterized according to a grid search. This grid search constraint forced the %PP value
347 to be equal to *x*%, with *x*% varying from 0% to 100% by steps of 5% (or even 1% at the edges
348 of the adequate %PP range). As this problem was often non-uniquely identifiable, leading to
349 different solutions with slightly distinct dietary patterns but similar *HR* values (especially for
350 the intermediate %PP values that allowed for a variety of food group combinations with a
351 similarly null *HR* value), we choose to systematically select the dietary solution that was the
352 most acceptable *a priori*, based on the lowest departure from the current diet. According to

353 the hierarchical method in multi-criteria optimization ⁶⁵, this second problem of diet selection
354 was addressed in a second stage. This time it was done by optimizing the *DD* criterion under
355 the constraint that *HR* was equal to its previously identified minimal value, always under all
356 the nutritional and acceptability constraints, and the grid search constraint on %PP covering
357 its previously identified adequate range.

358 Limiting nutrients and contribution of food groups to their intake

359 We conducted a dual value analysis to better characterize the tensions between %PP,
360 nutrient adequacy and long-term health. We reported the dual values associated with the
361 %PP equality constraint and the nutritional constraints during *HR* optimization (obtained
362 during the first problem solving, as explained above), which represent the potential *HR* gain
363 if the limiting bound (lower or upper) of the considered constraint was relaxed by one unit. In
364 order to compare the relative influence of nutrients, their dual values were standardized to
365 represent the potential *HR* gain if the limiting bound was relaxed by 10%, to classify nutrients
366 from the most limiting (higher absolute standardized dual value) to the least limiting (lowest
367 absolute standardized dual value).

368 For the most limiting nutrients in the different modeled diets (i.e., nutrients with the most
369 active constraints), we studied contributions of different food groups to intake of that particular
370 nutrient in each modeled diet identified for each adequate %PP value (i.e., in the modeled
371 diets resulting from the second problem solving, as explained above).

372 Sensitivity analysis

373 We also conducted a sensitivity analysis to assess the influence of some constraints of
374 particular interest. We thus compared the results obtained when requiring the deficiency
375 prevalence to be $\leq 1\%$ rather than $\leq 5\%$ (main model) in the nutritional constraints for

376 bioavailable iron and zinc (their alternative threshold values are given in Supplemental Table
377 6), and when removing or not (main model) all the dietary and acceptability constraints on
378 food group intakes.

379 Diet environmental impacts

380 Finally, to assess environmental pressures related to the observed and modeled diets, we
381 used the French agricultural life cycle inventory database AGRIBALYSE®; its methodological
382 approach (summarized in Supplemental Method 2) has been described elsewhere ⁶⁶⁻⁶⁸. In
383 particular, we evaluated the food-related GHGe (in kg CO₂eq, with the non-CO₂ GHGe
384 included and weighted according to their relative impact on warming), land use (referring to
385 the use and transformation of land, dimensionless), water use (relating to the local scarcity
386 of water, in m³ water deprivation) and fossil resource use (use of non-renewable fossil
387 resources such as coal, oil, and gas, in MJ), together with a single environmental footprint
388 score (dimensionless) that aggregated 16 indicators ⁶⁹.

389 **Acknowledgments and statement of authors' contributions to the manuscript**

390 The authors thank Vincent Colomb and Mélissa Cornélius (Ademe) for their important support
391 in the use of the Agribalyse database.

392 HF and FM designed the research; HF conducted the research and analyzed the data; AD,
393 EP, FM, JW, J-FH and EK-G provided methodological support and help with interpretation of
394 the results; HF and FM wrote the first draft of the manuscript; and all authors provided critical
395 comments on the manuscript. HF and FM had primary responsibility for the final content, and
396 all authors have read and approved the final manuscript.

References

- 1 Styring, A. K. *et al.* Refining human palaeodietary reconstruction using amino acid $\delta^{15}\text{N}$ values of plants, animals and humans. *J Archaeol Sci* **53**, 504-515, doi:10.1016/j.jas.2014.11.009 (2015).
- 2 WHO. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases. 3. Global and regional food consumption patterns and trends. Report No. 0512-3054, 1-149 (2003).
- 3 Winnie Gerbens-Leenes, P. in *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* (ed François Mariotti) 117-134 (Academic Press, 2017).
- 4 Phillips, S. M. *et al.* Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. *The American journal of clinical nutrition*, doi:10.3945/ajcn.114.084079 (2015).
- 5 Mariotti, F. Animal and Plant Protein Sources and Cardiometabolic Health. *Adv Nutr* **10**, S351-S366, doi:10.1093/advances/nmy110 (2019).
- 6 Lepine, G. *et al.* A Scoping Review: Metabolomics Signatures Associated with Animal and Plant Protein Intake and Their Potential Relation with Cardiometabolic Risk. *Adv Nutr* **12**, 2112-2131, doi:10.1093/advances/nmab073 (2021).
- 7 Richter, C. K., Skulas-Ray, A. C., Champagne, C. M. & Kris-Etherton, P. M. Plant Protein and Animal Proteins: Do They Differentially Affect Cardiovascular Disease Risk? *Adv Nutr* **6**, 712-728, doi:10.3945/an.115.009654 (2015).
- 8 Dietrich, S. *et al.* Amino acid intake and plasma concentrations and their interplay with gut microbiota in vegans and omnivores in Germany. *Eur J Nutr*, doi:10.1007/s00394-021-02790-y (2022).
- 9 Naghshi, S., Sadeghi, O., Willett, W. C. & Esmailzadeh, A. Dietary intake of total, animal, and plant proteins and risk of all cause, cardiovascular, and cancer mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective cohort studies. *BMJ* **370**, m2412, doi:10.1136/bmj.m2412 (2020).
- 10 Zhong, V. W. *et al.* Protein foods from animal sources, incident cardiovascular disease and all-cause mortality: a substitution analysis. *Int J Epidemiol*, doi:10.1093/ije/dyaa205 (2021).
- 11 Salomé, M. *et al.* 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* **150**, 536-545, doi:10.1093/jn/nxz252 (2020).
- 12 Malik, V. S., Li, Y., Tobias, D. K., Pan, A. & Hu, F. B. Dietary Protein Intake and Risk of Type 2 Diabetes in US Men and Women. *American journal of epidemiology* **183**, 715-728, doi:10.1093/aje/kwv268 (2016).
- 13 Tharrey, M. *et al.* Patterns of plant and animal protein intake are strongly associated with cardiovascular mortality: the Adventist Health Study-2 cohort. *Int J Epidemiol*, doi:10.1093/ije/dyy030 (2018).
- 14 Guasch-Ferre, M. *et al.* Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials of Red Meat Consumption in Comparison With Various Comparison Diets on Cardiovascular Risk Factors. *Circulation* **139**, 1828-1845, doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.118.035225 (2019).

- 15 Farvid, M. S. *et al.* Consumption of red meat and processed meat and cancer incidence: a systematic review and meta-analysis of prospective studies. *Eur J Epidemiol* **36**, 937-951, doi:10.1007/s10654-021-00741-9 (2021).
- 16 Huang, Y. *et al.* Red and processed meat consumption and cancer outcomes: Umbrella review. *Food Chem* **356**, 129697, doi:10.1016/j.foodchem.2021.129697 (2021).
- 17 Havemeier, S., Erickson, J. & Slavin, J. Dietary guidance for pulses: the challenge and opportunity to be part of both the vegetable and protein food groups. *Ann N Y Acad Sci* **1392**, 58-66, doi:10.1111/nyas.13308 (2017).
- 18 Comerford, K. B., Miller, G. D., Reinhardt Kapsak, W. & Brown, K. A. The Complementary Roles for Plant-Source and Animal-Source Foods in Sustainable Healthy Diets. *Nutrients* **13**, 3469, doi:10.3390/nu13103469 (2021).
- 19 Clark, M. A., Springmann, M., Hill, J. & Tilman, D. Multiple health and environmental impacts of foods. *Proc Natl Acad Sci U S A*, doi:10.1073/pnas.1906908116 (2019).
- 20 Katz, D. L., Doughty, K. N., Geagan, K., Jenkins, D. A. & Gardner, C. D. Perspective: The Public Health Case for Modernizing the Definition of Protein Quality. *Adv Nutr* **10**, 755-764, doi:10.1093/advances/nmz023 (2019).
- 21 Xu, X. M. *et al.* Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nat Food* **2**, 724+, doi:10.1038/s43016-021-00358-x (2021).
- 22 Jarmul, S. *et al.* Climate change mitigation through dietary change: a systematic review of empirical and modelling studies on the environmental footprints and health effects of 'sustainable diets'. *Envir Res Lett* **15**, 123014, doi:10.1088/1748-9326/abc2f7 (2020).
- 23 Reinhardt, S. L. *et al.* Systematic Review of Dietary Patterns and Sustainability in the United States. *Adv Nutr*, doi:10.1093/advances/nmaa026 (2020).
- 24 Kesse-Guyot, E. *et al.* Environmental and nutritional analysis of the EAT-Lancet diet at the individual level: insights from the NutriNet-Sante study. *J Clean Prod* **296**, 10, doi:10.1016/j.jclepro.2021.126555 (2021).
- 25 Willett, W. *et al.* Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet* **393**, 447-492, doi:10.1016/S0140-6736(18)31788-4 (2019).
- 26 Tuomisto, H. L. Importance of considering environmental sustainability in dietary guidelines. *Lancet Planet Health* **2**, e331-e332, doi:10.1016/S2542-5196(18)30174-8 (2018).
- 27 GBD Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet* **396**, 1223-1249, doi:10.1016/S0140-6736(20)30752-2 (2020).
- 28 Bakaloudi, D. R. *et al.* Intake and adequacy of the vegan diet. A systematic review of the evidence. *Clin Nutr* **40**, 3503-3521, doi:10.1016/j.clnu.2020.11.035 (2021).
- 29 Springmann, M. *et al.* Health and nutritional aspects of sustainable diet strategies and their association with environmental impacts: a global modelling analysis with country-level detail. *Lancet Planet Health* **2**, e451-e461, doi:10.1016/S2542-5196(18)30206-7 (2018).
- 30 Cifelli, C. J., Houchins, J. A., Demmer, E. & Fulgoni, V. L. Increasing Plant Based Foods or Dairy Foods Differentially Affects Nutrient Intakes: Dietary Scenarios Using NHANES 2007-2010. *Nutrients* **8**, doi:10.3390/nu8070422 (2016).

- 31 Mangano, K. M. & Tucker, K. L. in *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* (ed François Mariotti) 315-331 (Academic Press, 2017).
- 32 Thorpe, D. L., Beeson, W. L., Knutsen, R., Fraser, G. E. & Knutsen, S. F. Dietary patterns and hip fracture in the Adventist Health Study 2: combined vitamin D and calcium supplementation mitigate increased hip fracture risk among vegans. *The American journal of clinical nutrition*, doi:10.1093/ajcn/nqab095 (2021).
- 33 Craig, W. J. *et al.* The Safe and Effective Use of Plant-Based Diets with Guidelines for Health Professionals. *Nutrients* **13**, doi:10.3390/nu13114144 (2021).
- 34 Herforth, A. *et al.* A Global Review of Food-Based Dietary Guidelines. *Adv Nutr*, doi:10.1093/advances/nmy130 (2019).
- 35 Halkjaer, J. *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. *European journal of clinical nutrition* **63 Suppl 4**, S16-36, doi:10.1038/ejcn.2009.73 (2009).
- 36 Mariotti, F. & Gardner, C. D. Dietary Protein and Amino Acids in Vegetarian Diets-A Review. *Nutrients* **11**, doi:10.3390/nu11112661 (2019).
- 37 Young, V. R. & Pellett, P. L. Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition. *The American journal of clinical nutrition* **59**, 1203S-1212S, doi:10.1093/ajcn/59.5.1203S (1994).
- 38 Gazan, R. *et al.* Mathematical Optimization to Explore Tomorrow's Sustainable Diets: A Narrative Review. *Adv Nutr* **9**, 602-616, doi:10.1093/advances/nmy049 (2018).
- 39 Macdiarmid, J. I. *et al.* Sustainable diets for the future: Can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet? *The American journal of clinical nutrition* **96**, 632-639, doi:10.3945/ajcn.112.038729 (2012).
- 40 Seconda, L. *et al.* Conservative to disruptive diets for optimizing nutrition, environmental impacts and cost in French adults from the NutriNet-Sante cohort. *Nat Food* **2**, 174-182, doi:10.1038/s43016-021-00227-7 (2021).
- 41 Webb, D. & Byrd-Bredbenner, C. Overcoming Consumer Inertia to Dietary Guidance. *Adv Nutr* **6**, 391-396, doi:10.3945/an.115.008441 (2015).
- 42 Petersen, K. S. *et al.* Healthy Dietary Patterns for Preventing Cardiometabolic Disease: The Role of Plant-Based Foods and Animal Products. *Curr Dev Nutr* **1**, cdn.117.001289-cdn.001117.001289, doi:10.3945/cdn.117.001289 (2017).
- 43 Springmann, M., Godfray, H. C., Rayner, M. & Scarborough, P. Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change. *Proc Natl Acad Sci U S A* **113**, 4146-4151, doi:10.1073/pnas.1523119113 (2016).
- 44 Wilson, N., Cleghorn, C. L., Cobiac, L. J., Mizdrak, A. & Nghiem, N. Achieving Healthy and Sustainable Diets: A Review of the Results of Recent Mathematical Optimization Studies. *Adv Nutr* **10**, S389-S403, doi:10.1093/advances/nmz037 (2019).
- 45 Kesse-Guyot, E. *et al.* Sustainability analysis of French dietary guidelines using multiple criteria. *Nat Sustain* **3**, 377-385, doi:10.1038/s41893-020-0495-8 (2020).
- 46 Segovia-Siapco, G. & Sabate, J. 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*, doi:10.1038/s41430-018-0310-z (2018).

- 47 Baudry, J. *et al.* Improvement of diet sustainability with increased level of organic food in the diet: findings from the BioNutriNet cohort. *The American journal of clinical nutrition* **109**, 1173-1188, doi:10.1093/ajcn/nqy361 (2019).
- 48 Nelson, M. E., Hamm, M. W., Hu, F. B., Abrams, S. A. & Griffin, T. S. Alignment of Healthy Dietary Patterns and Environmental Sustainability: A Systematic Review. *Adv Nutr* **7**, 1005-1025, doi:10.3945/an.116.012567 (2016).
- 49 Crippa, M. *et al.* Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nat Food* **2**, 198-209, doi:10.1038/s43016-021-00225-9 (2021).
- 50 Poore, J. & Nemecek, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science* **360**, 987-992, doi:10.1126/science.aaq0216 (2018).
- 51 Godfray, H. C. J. *et al.* Meat consumption, health, and the environment. *Science* **361**, doi:10.1126/science.aam5324 (2018).
- 52 Mariotti, F. *et al.* Perspective: Modeling Healthy Eating Patterns for Food-Based Dietary Guidelines-Scientific Concepts, Methodological Processes, Limitations, and Lessons. *Adv Nutr* **12**, 590-599, doi:10.1093/advances/nmaa176 (2021).
- 53 Wickramasinghe, K. *et al.* The shift to plant-based diets: are we missing the point? *Global Food Security* **29**, 100530, doi:10.1016/j.gfs.2021.100530 (2021).
- 54 Reganold, J. P. & Wachter, J. M. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nat Plants* **2**, doi:10.1038/NPLANTS.2015.221 (2016).
- 55 Nijdam, D., Rood, T. & Westhoek, H. 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**, 760-770, doi:10.1016/j.foodpol.2012.08.002 (2012).
- 56 Dubuisson, C. *et al.* 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* **22**, 584-600, doi:10.1017/S1368980018002896 (2019).
- 57 The French Agency for Food Environmental and Occupational Health & Safety (ANSES). *ANSES-CIQUAL French food composition table* (version 2016); <https://ciqual.anses.fr/>.
- 58 Dussiot, A. *et al.* Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc - a diet optimization study in French Adults. *The American journal of clinical nutrition*, doi:10.1093/ajcn/nqab373 (2021).
- 59 The French Agency for Food Environmental and Occupational Health & Safety (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, 2021); <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2018SA0238Ra.pdf>.
- 60 Armah, S. M., Carriquiry, A., Sullivan, D., Cook, J. D. & Reddy, M. B. A complete diet-based algorithm for predicting nonheme iron absorption in adults. *J Nutr* **143**, 1136-1140, doi:10.3945/jn.112.169904 (2013).
- 61 Hallberg, L. & Hulthen, L. Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. *The American journal of clinical nutrition* **71**, 1147-1160, doi:10.1093/ajcn/71.5.1147 (2000).

- 62 Miller, L. V., Krebs, N. F. & Hambidge, K. M. Mathematical model of zinc absorption: effects of dietary calcium, protein and iron on zinc absorption. *The British journal of nutrition* **109**, 695-700, doi:10.1017/S000711451200195X (2013).
- 63 Gavelle, E., Huneau, J. F. & Mariotti, F. Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. *Nutrients* **10**, doi:10.3390/nu10020226 (2018).
- 64 de Gavelle, E., Huneau, J. F., Bianchi, C. M., Verger, E. O. & Mariotti, F. Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults. *Nutrients* **9**, doi:10.3390/nu9121333 (2017).
- 65 Mausser, H., Grodzewich, O. & Romanko, O. in *Proceedings of the Fields–MITACS Industrial Problems Workshop*. 89-101.
- 66 *Agribalyse data v3.0* (ADEME, 2020); <https://doc.agribalyse.fr/documentation-en/>.
- 67 Colomb, V. *et al.* AGRIBALYSE (R), the French LCI Database for agricultural products: high quality data for producers and environmental labelling. *Ocl-Oilseeds and Fats Crops and Lipids* **22**, doi:10.1051/ocl/20140047 (2015).
- 68 Koch, P. & Salou, T. *AGRIBALYSE®: Rapport Méthodologique - Volet Agriculture - Version 3.0* (ADEME, 2020); Available from: www.ademe.fr/agribalyse-en.
- 69 European Commission. *Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs)* (version 6.3, 2018); https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf.

Table 1. Range of adequate values of the percentage of plant protein in the diet (%PP) and corresponding minimal values of long-term health risk (*HR*) in French males and females.

%PP	Males							Females					
	Observed diet	Modeled diets						Observed diet	Modeled diets				
	33%	16%	20%	25%-70%	75%	80%	82%	34%	16%	20%	25%-70%	75%	77%
<i>HR</i> value	0.983	0.602	0.180	0.000	0.004	0.024	0.049	0.736	0.516	0.065	0.000	0.039	0.052
<i>HR</i> components:													
<i>Risk of excessive intake of unhealthy foods:</i>													
Red meat	0.236	0.211	0.065	0.000	0.000	0.000	0.023	0.207	0.347	0.000	0.000	0.000	0.000
Processed meat	0.213	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.126	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Sweetened beverages	0.026	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.024	0.000	0.000	0.000	0.002	0.013
<i>Risk of insufficient intake of healthy foods:</i>													
Whole grain products	0.213	0.195	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.157	0.090	0.000	0.000	0.000	0.000
Legumes	0.111	0.127	0.067	0.000	0.000	0.000	0.000	0.053	0.056	0.042	0.000	0.000	0.000
Fruits	0.091	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.093	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Vegetables	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.021	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nuts & seeds	0.039	0.048	0.048	0.000	0.000	0.000	0.000	0.019	0.023	0.023	0.000	0.000	0.000
Milk	0.022	0.000	0.000	0.000	0.004	0.024	0.026	0.037	0.000	0.000	0.000	0.037	0.039

Values of the *HR* criterion and its individual components when optimizing *HR* under all the nutritional, dietary and acceptability constraints and an additional constraint imposing the %PP value according to an iterative grid search. Results are reported for the %PP values allowing model convergence (i.e., nutrient-adequate diets) for each sex (16%-82% and 16%-77% %PP ranges in males and females, respectively). Within these %PP values, those outside the 25%-70% range have non-null *HR* values because of excessive intake of unhealthy foods and/or insufficient intake of healthy foods.

Table 2. Dual values of the active constraints identified during minimization of the long-term health risk (*HR*) in French males and females¹.

%PP	Males						Females				
	Modeled diets						Modeled diets				
	16%	20%	25%-70%	75%	80%	82%	16%	20%	25%-70%	75%	77%
%PP constraint²	-0.246	-0.081	NS	0.003	0.004	0.037	-0.166	-0.042	NS	0.004	0.017
Nutrients that are more limiting as %PP increase³											
Iodine	NS	NS	NS	0,002	0,005	0,058	NS	NS	NS	0.006	0.043
Sodium	NS	-0.023	NS	-0,002	-0,005	-0,041	NS	NS	NS	-0.006	-0.027
Bioavailable iron	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0.096	NS	0.014	0.027
Vitamin B12	NS	NS	NS	0.002	0.004	0.035	NS	NS	NS	NS	NS
Vitamin B2	NS	NS	NS	NS	0.001	0.006	NS	NS	NS	NS	0.021
Calcium	NS	NS	NS	NS	0.001	0.009	NS	NS	NS	0.001	0.013
EPA+DHA	NS	NS	NS	0.001	0.001	0.007	NS	NS	NS	0.002	0.009
Vitamin A	NS	NS	NS	0.001	0.002	0.009	NS	NS	NS	0.004	0.001
α-linolenic acid	NS	NS	NS	0.001	0.001	0.001	NS	NS	NS	0.001	0.004
Nutrients that are more limiting as %PP decrease³											
Fiber	0.435	0.136	NS	NS	NS	NS	0.332	0.077	NS	NS	NS
Sugar excluding lactose	-0.125	-0.044	NS	NS	NS	-0.012	-0.106	-0.030	NS	NS	-0.002
Saturated fatty acids	-0.095	-0.074	NS	NS	NS	NS	-0.085	-0.036	NS	NS	NS
Atherogenic fatty acids	-0.083	-0.001	NS	NS	NS	NS	-0.094	-0.006	NS	NS	NS

¹Dual values when optimizing *HR* under all the nutritional, dietary and acceptability constraints and an equality constraint imposing the percentage of plant protein in the diet (%PP) value according to an iterative grid search. Results are reported for the %PP values allowing nutrient-adequate diets (16%-82% and 16%-77% %PP ranges in males and females, respectively), which includes those also allowing a null *HR* value (25%-70% %PP range in both sexes). NS, not significant (<0.0001).

²For the %PP equality constraint, dual values represent the potential effect on *HR* of the relaxation by one unit of the limiting bound, with positive (negative) values if the lower (upper) bound is limiting (e.g., for %PP=82% in males, the dual value indicates that there would be a potential *HR* gain of 0.037 if %PP was decreased from 82% to 81%).

³For nutritional constraints, dual values have been standardized to represent the potential effect on *HR* of the relaxation by 10% of the limiting bound, to classify the nutrients from the most limiting (higher absolute value) to the least limiting (lowest absolute value). Limiting nutrients have a positive (negative) dual value if their lower (upper) bound is limiting (e.g., for %PP=82% in males, the dual value for iodine indicates that there would be a potential *HR* gain of 0.058 if the lower bound for iodine intake was decreased by 10%, from 150 to 135 μ g/d). Only nutrients with an active constraint (i.e., with a non-null dual value) for at least one %PP value 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 limiting. Atherogenic fatty acids, lauric and myristic and palmitic acids; DHA, docosahexaenoic acid; EPA, eicosapentaenoic acid.

Figure legends

Figure 1. Daily food category consumption in the observed diets (obs) and modeled diets obtained by long-term health risk (*HR*) and diet departure (*DD*) minimization under imposed percentage of plant protein in the diet (%PP) in French adults. Results are reported for all the adequate %PP values ensuring nutrient adequacy (16%-77%), which includes those also ensuring a null *HR* value (25%-70%). The bar charts represent the cumulative consumptions of food categories (black axis on the left) and the curves represent the *HR* and *DD* values (blue and pink axes on the right, respectively). For clarity, the 45 modeled food groups are not represented here but grouped into broader categories that are included in *HR* (such as red and processed meats) or represent other protein sources (such as poultry and seafood). Consumption of water, hot beverages, alcohol and miscellaneous foods are not shown for clarity. Details about food grouping and consumptions of food categories not shown here are given in Supplemental Tables 5 and 2, respectively.

Figure 2. Contribution of food categories to protein intake in the observed diets (obs) and modeled diets obtained by long-term health risk (*HR*) and diet departure minimization under imposed percentage of plant protein in the diet (%PP) in French adults. Results are reported for all the adequate %PP values ensuring nutrient adequacy (16%-77%), which includes those ensuring also a null *HR* value (25%-70%). Sections inside the bars represent the contributions of food categories to protein intake (in g of protein/kg of BW/d). See Supplemental Table 5 for the detailed composition of food categories.

Figure 3. Greenhouse gas emissions (GHGe) associated with the observed (obs) and modeled diets obtained by long-term health risk (*HR*) and diet departure minimization under imposed percentage of plant protein in the diet (%PP) in French adults. Results are reported for all the adequate %PP values ensuring nutrient adequacy (16%-77%), which includes those ensuring also a null *HR* value (25%-70%). Sections inside the

bars represent the contributions of food categories to GHGe (in kg CO₂ eq), and values above the bars represent the relative deviation in GHGe from its observed value (in %). See Supplemental Table 5 for the detailed composition of food categories.

Figure 1.

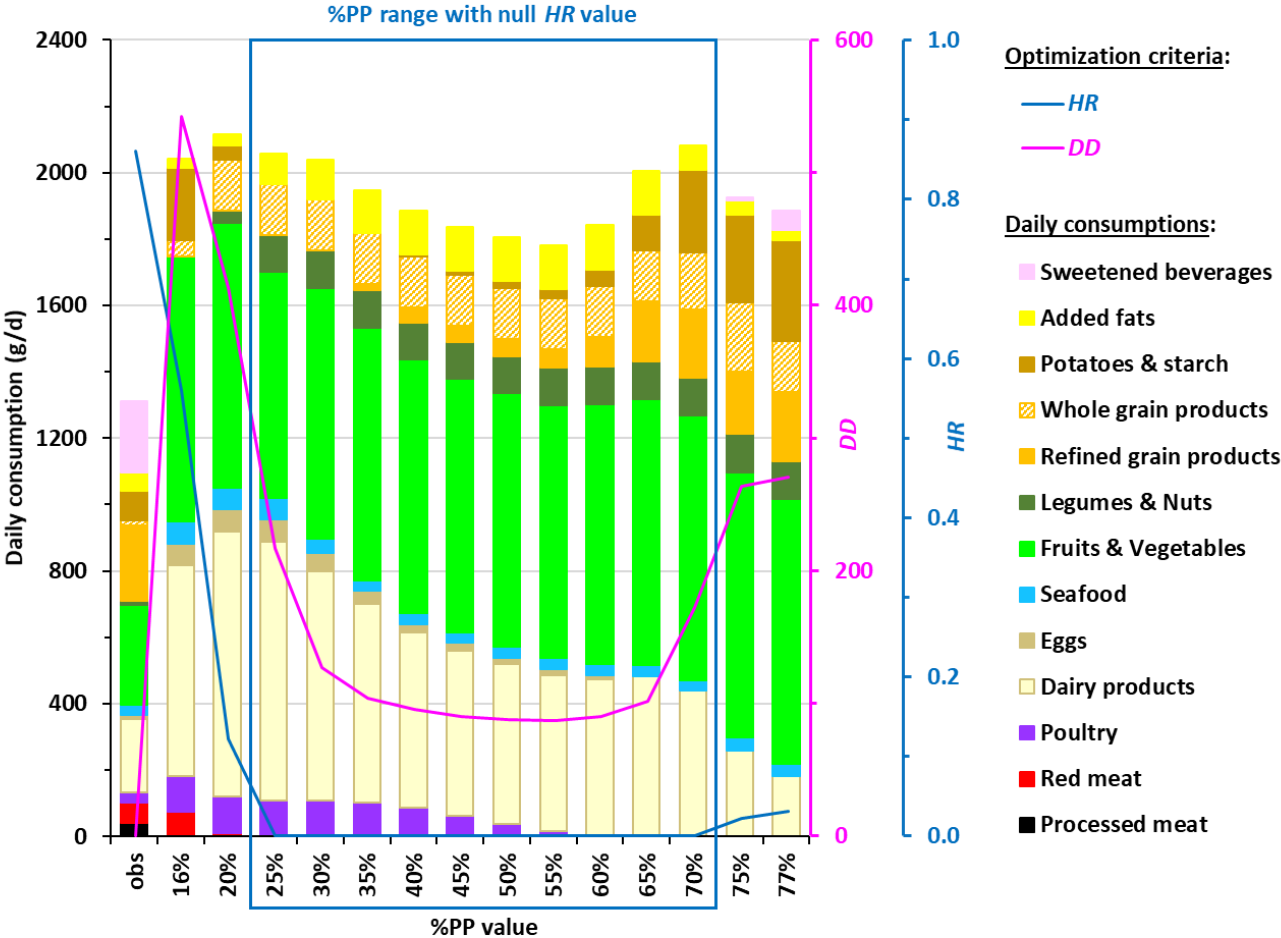


Figure 2.

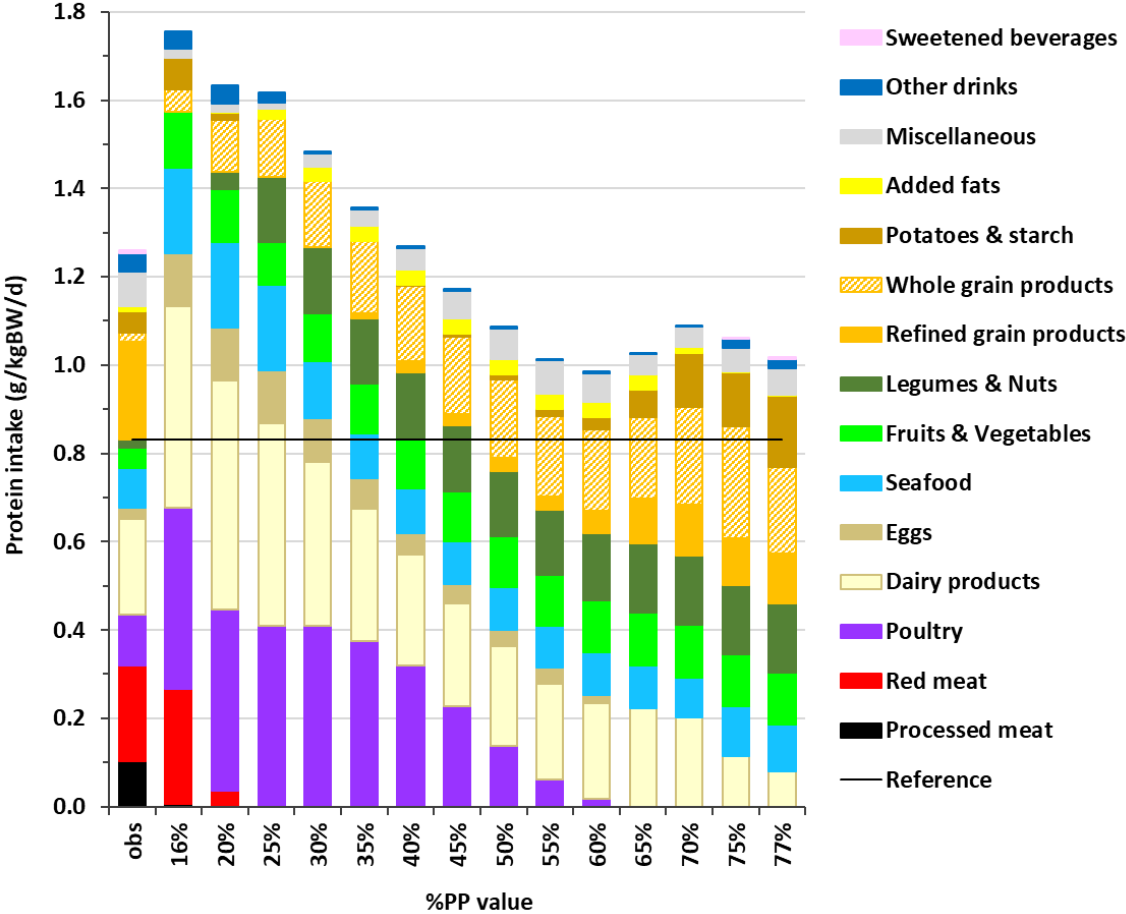
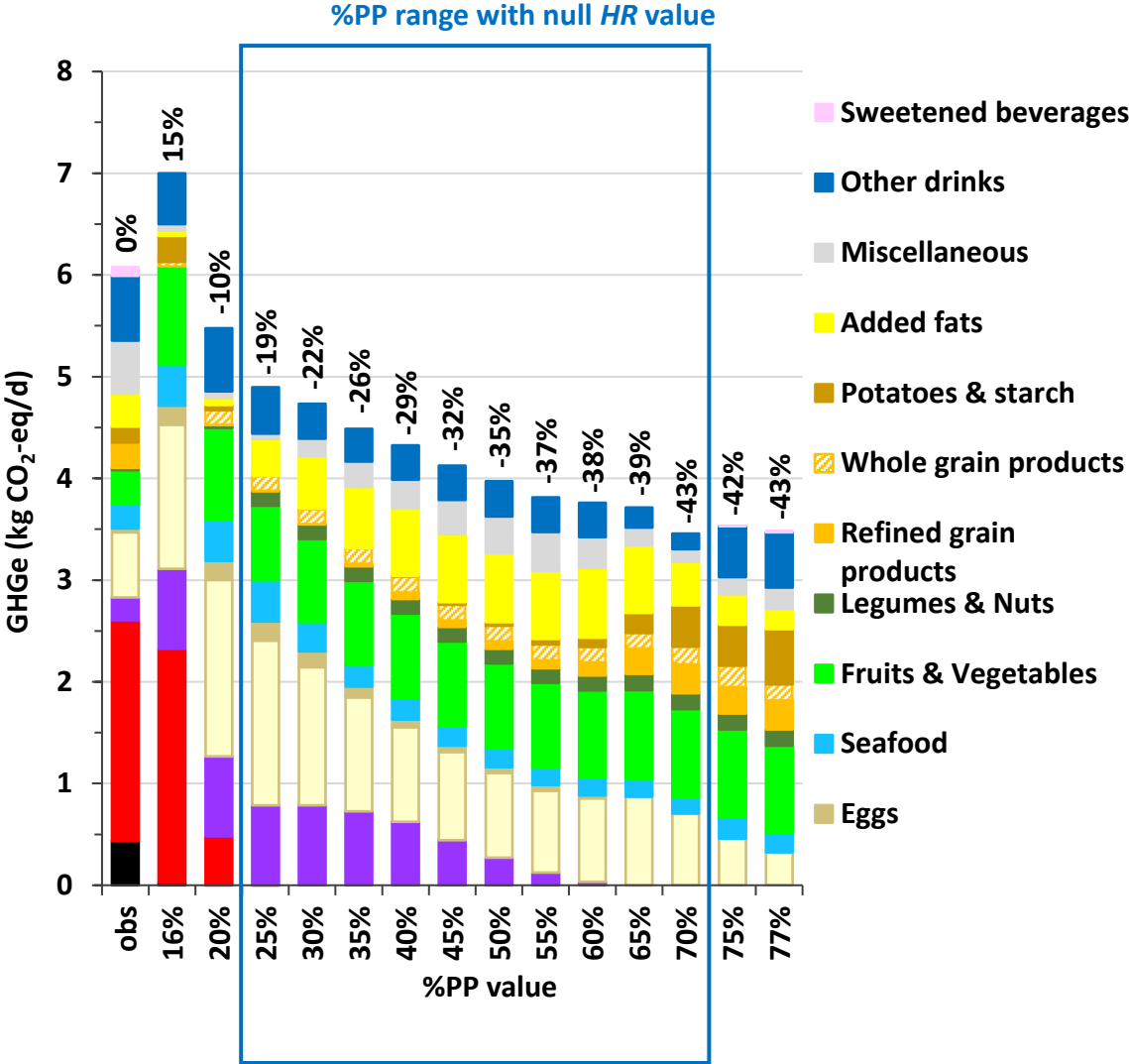


Figure 3.



Annexe 5. Teneurs moyennes en protéines végétales et animales par groupe alimentaire chez les hommes et chez les femmes (en g/100g d'aliment)

Ssssgpe	Hommes			Femmes		
	proteines_brutes			proteines_brutes		
	totales	fraction végétale	fraction animale	totales	fraction végétale	fraction animale
Légumes	1.46	1.46	0	1.44	1.44	0
Fruits frais	0.7	0.7	0	0.7	0.7	0
Fruits secs	2.17	2.17	0	1.92	1.92	0
Fruits transformés : compotes et fruits cuits	0.33	0.33	0	0.33	0.33	0
Noix, graines et fruits oléagineux	23.16	23.16	0	21.74	21.74	0
Pain et produits de panification raffinés	8.92	8.82	0.09	8.97	8.8	0.15
Pain et produits de panification complets et semi-complets	10.1	9.84	0.25	10.24	9.98	0.26
Autres féculents raffinés	4.1	3.98	0.12	4.01	3.94	0.06
Autres féculents complets et semi-complets	4.93	4.93	0	4.53	4.53	0
Produits à base d'amidon, transformés sucrés/gras	8.04	6.32	1.72	8.1	6.34	1.76
Produits à base d'amidon transformés salés/gras	7.84	7.66	0.17	7.85	7.5	0.35
Pommes de terre et autres tubercules	2.4	2.4	0	2.41	2.41	0
Légumineuses	7.68	7.68	0	7.62	7.62	0
Volailles	26.85	0.01	26.84	26.72	0.02	26.7
Boeufs et veaux	26.06	0	26.06	26.01	0.01	26.01
Porcs et autres viandes	26.17	0	26.16	26.68	0	26.68
Abats	21.54	0	21.54	26.3	0	26.3
Charcuteries	18.64	0.02	18.62	18.48	0.01	18.47
Poissons gras	22.05	0	22.05	21.91	0	21.91
Poissons maigres	20.69	0.4	20.29	21.09	0.36	20.73
Mollusques et crustacés	23.51	0.01	23.51	17.04	0.04	16.86
Oeufs et plats à base d'Oeufs	13.13	0	13.13	12.74	0	12.74
Lait	3.28	0	3.28	3.31	0	3.31
Produits laitiers frais natures	4.97	0	4.97	4.86	0	4.86
Produits laitiers frais sucrés	3.35	0.03	3.32	3.52	0.02	3.5
Desserts sucrés lactés	3.43	0.72	2.7	3.45	0.77	2.68
Fromages	21.55	0	21.55	21.28	0	21.28
Graisses animales et assimilés	2.65	0	2.65	0.61	0	0.61
Beurres et beurres allégés	0.73	0	0.73	0.72	0	0.72
Matières grasses végétales riches en ALA	0	0	0	0	0	0
Matières grasses végétales pauvres en ALA	0.04	0.04	0	0.03	0.03	0
Sauces et crèmes fraîches	2.29	0.86	1.43	2.27	0.78	1.49
Produits sucrés ou Produits sucrés et gras	4.31	2.37	1.95	4.6	2.63	1.97
Eaux de boisson	0	0	0	0	0	0
Boissons sucrées de type soda	0.07	0.07	0	0.08	0.08	0
Jus de fruits	0.54	0.54	0	0.53	0.53	0
Boissons chaudes	0.55	0.21	0.34	0.52	0.17	0.35
Sel	0.02	0.02	0	0.04	0.04	0
Condiments	1.61	1.51	0.1	1.66	1.62	0.04
Herbes aromatiques, Epices (sauf sel)	7.07	7.07	0	7.29	7.29	0
Soupes	1.37	1	0.37	1.29	0.97	0.31
Bouillons	0.58	0.06	0.52	0.64	0.23	0.41
Substituts de produits animaux	3.41	3.41	0	6.51	6.51	0
Autres aliments	5.46	4.71	0.75	3.94	3.80	0.13
Boissons alcoolisées	0.23	0.23	0	0.23	0.23	0

Tableau 15. Teneurs moyennes en protéines végétales et animales par groupe alimentaire chez les hommes et chez les femmes (en g/100g d'aliment)

Références

- Abejón, R., Batlle-Bayer, L., Laso, J., Bala, A., Vazquez-Rowe, I., Larrea-Gallegos, G., Margallo, M., *et al.* (2020), “Multi-Objective Optimization of Nutritional, Environmental and Economic Aspects of Diets Applied to the Spanish Context”, *Foods*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 9 No. 11, p. 1677.
- Abete, I., Romaguera, D., Vieira, A.R., de Munain, A.L. and Norat, T. (2014), “Association between total, processed, red and white meat consumption and all-cause, CVD and IHD mortality: a meta-analysis of cohort studies”, *British Journal of Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. 112 No. 5, pp. 762–775.
- Afshin, A., Sur, P.J., Fay, K.A., Cornaby, L., Ferrara, G., Salama, J.S., Mullany, E.C., *et al.* (2019), “Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990–2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017”, *The Lancet*, Vol. 393 No. 10184, pp. 1958–1972.
- Agnoli, C., Baroni, L., Bertini, I., Ciappellano, S., Fabbri, A., Papa, M., Pellegrini, N., *et al.* (2017), “Position paper on vegetarian diets from the working group of the Italian Society of Human Nutrition”, *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, Vol. 27 No. 12, pp. 1037–1052.
- Agovi, H., Pierguidi, L., Dinnella, C., Viggiano, M.P., Monteleone, E. and Spinelli, S. (2022), “Attentional bias for vegetables is negatively associated with acceptability and is related to sensory properties”, *Food Quality and Preference*, Vol. 96, p. 104429.
- AGRIBALYSE 3.0, *the French Agricultural and Food LCI Database, Methodology for Food Products*, collective expertise report. (2020), , ADEME, Paris, France, p. 85.
- Aleksandrowicz, L., Green, R., Joy, E.J.M., Smith, P. and Haines, A. (2016), “The Impacts of Dietary Change on Greenhouse Gas Emissions, Land Use, Water Use, and Health: A Systematic Review”, edited by Wiley, A.S.*PLOS ONE*, Vol. 11 No. 11, available at:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165797>.
- Allès, B., Baudry, J., Méjean, C., Touvier, M., Péneau, S., Hercberg, S. and Kesse-Guyot, E. (2017), “Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Santé Study”, *Nutrients*, Vol. 9 No. 9, p. 1023.
- Amirabdollahian, F. (2008), *Zinc Adequacy in the UK Population*, London Metropolitan University, October.
- Andreoli, V., Bagliani, M., Corsi, A. and Frontuto, V. (2021), “Drivers of Protein Consumption: A Cross-Country Analysis”, *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 13, p. 7399.

- Angelino, D., Godos, J., Ghelfi, F., Tieri, M., Titta, L., Lafranconi, A., Marventano, S., *et al.* (2019), “Fruit and vegetable consumption and health outcomes: an umbrella review of observational studies”, *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, Vol. 70 No. 6, pp. 652–667.
- Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations.* (2007), , Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), p. 280.
- Armah, S.M., Carriquiry, A., Sullivan, D., Cook, J.D. and Reddy, M.B. (2013), “A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 143 No. 7, pp. 1136–1140.
- Arrieta, E.M. and González, A.D. (2018), “Impact of current, National Dietary Guidelines and alternative diets on greenhouse gas emissions in Argentina”, *Food Policy*, Vol. 79, pp. 58–66.
- Assessing the Iron Status of Populations: Including Literature Reviews: Report of a Joint World Health Organization/Centers for Disease Control and Prevention Technical Consultation on the Assessment of Iron Status at the Population Level, Geneva, Switzerland, 6-8 April 2004, 978-92-4-159610-7.* (2007), , World Health Organization, p. 31.
- Aune, D., Keum, N., Giovannucci, E., Fadnes, L.T., Boffetta, P., Greenwood, D.C., Tonstad, S., *et al.* (2016), “Whole grain consumption and risk of cardiovascular disease, cancer, and all cause and cause specific mortality: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies”, *BMJ*, British Medical Journal Publishing Group, Vol. 353, p. i2716.
- Avis relatif aux objectifs de santé publique quantifiés pour la politique nutritionnelle de santé publique (PNNS) 2018-2022.* (2018), , Haut Conseil de la Santé Publique, available at: <https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/AvisRapportsDomaine?clefr=648> (accessed 3 March 2022).
- Bakaloudi, D.R., Halloran, A., Rippin, H.L., Oikonomidou, A.C., Dardavesis, T.I., Williams, J., Wickramasinghe, K., *et al.* (2021), “Intake and adequacy of the vegan diet. A systematic review of the evidence”, *Clinical Nutrition*, Vol. 40 No. 5, pp. 3503–3521.
- Barbier, C., Couturier, C., Dumas, P., Kesse-Guyot, E., BAUDRY, J., Pharabod, I., Pourouchottamin, P., *et al.* (2022), *Simulation prospective du Système Alimentaire et de son Empreinte carbone (SISAE)*, CNRS; CIRED; SOLAGRO; CIRAD; INRAE-EREN; PhiLabs; EDF R&D; LAET, available at: <https://solagro.org/travaux-et-productions/publications/simulation-prospective-du-systeme-alimentaire-et-de-son-empreinte-carbone-sisae> (accessed 6 August 2022).

- Barré, T., Perignon, M., Gazan, R., Vieux, F., Micard, V., Amiot, M.-J. and Darmon, N. (2018), "Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption?", edited by de Souza, R.J. *PLOS ONE*, Vol. 13 No. 2, available at: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191767>.
- Batis, C., Marrón-Ponce, J.A., Stern, D., Vandevijvere, S., Barquera, S. and Rivera, J.A. (2021), "Adoption of healthy and sustainable diets in Mexico does not imply higher expenditure on food", *Nature Food*, pp. 1–10.
- Batz, C., Faucon, F. and Voynet, D. (2016), *Evaluation Du Programme National Nutrition Santé 2011-2015 et 2016 (PNNS3) et Du Plan Obésité 2010-2013.*, Inspection Générale des Affaires Sociales, Paris, France, p. 151.
- Bauchart, D., Chantelot, F. and Gandemer, G. (2008), *Qualités Nutritionnelles de La Viande et Des Abats Chez Le Bovin : Données Récentes Sur Les Principaux Constituants d'intérêt Nutritionnel*, Cahiers de nutrition et de diététique, INRAE, pp. 29–39.
- Baudry, J., Rebouillat, P., Allès, B., Cravedi, J.-P., Touvier, M., Hercberg, S., Lairon, D., *et al.* (2021), "Estimated dietary exposure to pesticide residues based on organic and conventional data in omnivores, pescovegetarians, vegetarians and vegans", *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, Vol. 153, p. 112179.
- Baudry, J., Touvier, M., Allès, B., Péneau, S., Méjean, C., Galan, P., Hercberg, S., *et al.* (2016), "Typology of eaters based on conventional and organic food consumption: results from the NutriNet-Santé cohort study", *British Journal of Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. 116 No. 4, pp. 700–709.
- Bazaraa, M.S., Sherali, H.D. and Shetty, C.M. (2006), *Nonlinear Programming: Theory and Algorithms*, Wiley.
- Becerra-Tomás, N., Papandreou, C. and Salas-Salvadó, J. (2019), "Legume Consumption and Cardiometabolic Health", *Advances in Nutrition*, Vol. 10 No. Supplement_4, pp. S437–S450.
- Bel-Serrat, S., Stammers, A.-L., Warthon-Medina, M., Moran, V.H., Iglesia-Altaba, I., Hermoso, M., Moreno, L.A., *et al.* (2014), "Factors that affect zinc bioavailability and losses in adult and elderly populations", *Nutrition Reviews*, Vol. 72 No. 5, pp. 334–352.
- Benvenuti, L., De Santis, A., Di Sero, A. and Franco, N. (2019), "Concurrent economic and environmental impacts of food consumption: are low emissions diets affordable?", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 236, p. 117645.

- Birt, C., Buzeti, T. and Grosso, G. (2017), *Healthy and Sustainable Diets for European Countries*. In: EUPHA. Brussels: European Public Health Association - EUPHA, 2017., European Public Health Association - EUPHA, Brussels, p. 88.
- de Boer, J. and Aiking, H. (2021), "Considering how farm animal welfare concerns may contribute to more sustainable diets", *Appetite*, p. 105786.
- de Boer, J. and Aiking, H. (2022), "How meat reduction differs from other personal climate actions: Distinct concerns and cultural barriers among EU consumers", *Food Quality and Preference*, Vol. 101, p. 104646.
- Boué, G., Guillou, S., Antignac, J.-P., Bizec, B.L. and Membré, J.-M. (2015), "Public Health Risk-benefit Assessment Associated with Food Consumption—A Review", *European Journal of Nutrition & Food Safety*, pp. 32–58.
- Bradbury, K.E., Tong, T.Y.N. and Key, T.J. (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*, Vol. 9 No. 12, p. E1317.
- Brestenský, M., Nitrayová, S., Patráš, P. and Nitray, J. (2019), "Dietary Requirements for Proteins and Amino Acids in Human Nutrition", *Current Nutrition & Food Science*, Vol. 15 No. 7, pp. 638–645.
- Broekema, R., Tyszler, M., van 't Veer, P., Kok, F.J., Martin, A., Lluch, A. and Blonk, H.T.J. (2020), "Future-proof and sustainable healthy diets based on current eating patterns in the Netherlands", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 112 No. 5, pp. 1338–1347.
- Brown, K.H., Rivera, J.A., Bhutta, Z., Gibson, R.S., King, J.C., Lönnerdal, B., Ruel, M.T., *et al.* (2004), "International Zinc Nutrition Consultative Group technical document. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control", *Food and Nutrition Bulletin*, Vol. 25 No. 1 Suppl 2, pp. S99-203.
- Brunin, J., Pointereau, P., Allès, B., Touvier, M., Hercberg, S., Lairon, D., Baudry, J., *et al.* (2022), "Are recent dietary changes observed in the NutriNet-Santé participants healthier and more sustainable?", *European Journal of Nutrition*, Vol. 61 No. 1, pp. 141–155.
- Cámara, M., Giner, R.M., González-Fandos, E., López-García, E., Mañes, J., Portillo, M.P., Rafecas, M., *et al.* (2021), "Food-Based Dietary Guidelines around the World: A Comparative Analysis to Update AESAN

- Scientific Committee Dietary Recommendations”, *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 9, p. 3131.
- Camaschella, C. (2015), “Iron-deficiency anemia”, *The New England Journal of Medicine*, Vol. 372 No. 19, pp. 1832–1843.
- Cambeses-Franco, C., González-García, S., Feijoo, G. and Moreira, M.T. (2022), “Driving commitment to sustainable food policies within the framework of American and European dietary guidelines”, *Science of The Total Environment*, Vol. 807, p. 150894.
- Camilleri, G.M., Verger, E.O., Huneau, J.-F., Carpentier, F., Dubuisson, C. and Mariotti, F. (2013), “Plant and Animal Protein Intakes Are Differently Associated with Nutrient Adequacy of the Diet of French Adults”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 143 No. 9, pp. 1466–1473.
- Cayot, P. (2021), *Substituts à la viande : formulations et analyse comparée*, revue scientifique No. VPC-2021-3736, Viandes et Produits Carnés, p. 14.
- CFS Voluntary Guidelines on Food Systems and Nutrition*. (2021), , Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italy, p. 28.
- Chai, B.C., van der Voort, J.R., Grofelnik, K., Eliasdottir, H.G., Klöss, I. and Perez-Cueto, F.J.A. (2019), “Which Diet Has the Least Environmental Impact on Our Planet? A Systematic Review of Vegan, Vegetarian and Omnivorous Diets”, *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 11 No. 15, p. 4110.
- Chaudhary, A. and Krishna, V. (2019), “Country-Specific Sustainable Diets Using Optimization Algorithm”, *Environmental Science & Technology*, American Chemical Society, Vol. 53 No. 13, pp. 7694–7703.
- Choudhury, D., Singh, S., Seah, J.S.H., Yeo, D.C.L. and Tan, L.P. (2020), “Commercialization of Plant-Based Meat Alternatives”, *Trends in Plant Science*, Elsevier, Vol. 25 No. 11, pp. 1055–1058.
- CIQUAL. (2017), “The ANSES-CIQUAL food composition table”, available at: <https://ciqual.anses.fr/#> (accessed 22 June 2021).
- CIQUAL. (2020), “The ANSES-CIQUAL food composition table”, available at: <https://ciqual.anses.fr/#> (accessed 30 March 2022).
- Clark, M., Macdiarmid, J., Jones, A.D., Ranganathan, J., Herrero, M. and Fanzo, J. (2020), “The Role of Healthy Diets in Environmentally Sustainable Food Systems”, *Food and Nutrition Bulletin*, Vol. 41 No. 2_suppl, pp. 31S-58S.

- Clark, M.A., Springmann, M., Hill, J. and Tilman, D. (2019), "Multiple health and environmental impacts of foods", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, National Academy of Sciences, Vol. 116 No. 46, pp. 23357–23362.
- Clarys, P., Deliens, T., Huybrechts, I., Deriemaeker, P., Vanaelst, B., De Keyzer, W., Hebbelinck, M., *et al.* (2014), "Comparison of Nutritional Quality of the Vegan, Vegetarian, Semi-Vegetarian, Pesco-Vegetarian and Omnivorous Diet", *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 6 No. 3, pp. 1318–1332.
- Clune, S., Crossin, E. and Verghese, K. (2017), "Systematic review of greenhouse gas emissions for different fresh food categories", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 140, pp. 766–783.
- Cocking, C., Walton, J., Kehoe, L., Cashman, K. and 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 Reviews*, Vol. 33, pp. 181–189.
- Coelho, C.R.V., Pernollet, F. and Werf, H.M.G. van der. (2016), "Environmental Life Cycle Assessment of Diets with Improved Omega-3 Fatty Acid Profiles", *PLOS ONE*, Public Library of Science, Vol. 11 No. 8, p. e0160397.
- Coleman, P.C., Murphy, L., Nyman, M. and Oyebo, O. (2021), "Operationalising the EAT– Lancet Commissions' targets to achieve healthy and sustainable diets", *The Lancet Planetary Health*, Elsevier, Vol. 5 No. 7, pp. e398–e399.
- Collings, R., Harvey, L.J., Hooper, L., Hurst, R., Brown, T.J., Ansett, J., King, M., *et al.* (2013), "The absorption of iron from whole diets: a systematic review", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 98 No. 1, pp. 65–81.
- Colomb, V., Amar, S.A., Basset-Mens, C., Gac, A., Gaillard, G., Koch, P., Mousset, J., *et al.* (2015), "AGRIBALYSE, the French LCI database for agricultural products: high quality data for producers and environmental labelling", *OCL Oilseeds and Fats Crops and Lipids*, EDP, Vol. 22 No. 1, p. D104.
- 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. (2019), , FranceAgriMer, p. 36.
- Comerford, K.B., Miller, G.D., Reinhardt Kapsak, W. and Brown, K.A. (2021), "The Complementary Roles for Plant-Source and Animal-Source Foods in Sustainable Healthy Diets", *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 10, p. 3469.

- Conrad, Z., Karlsen, M., Chui, K. and Jahns, L. (2017), "Diet quality on meatless days: National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES), 2007–2012", *Public Health Nutrition*, Vol. 20 No. 9, pp. 1564–1573.
- Consommation Des Produits Carnés En 2019*, Édition septembre 2020. (2020), , FranceAgriMer, available at: <https://www.franceagrimer.fr/fam/content/download/64994/document/STA-VIA-Consommation%20des%20produits%20carn%C3%A9s%20en%202019.pdf?version=1> (accessed 25 May 2022).
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F.N. and Leip, A. (2021), "Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions", *Nature Food*, Vol. 2 No. 3, pp. 198–209.
- Dagevos, H. (2021), "Finding flexitarians: Current studies on meat eaters and meat reducers", *Trends in Food Science & Technology*, Vol. 114, pp. 530–539.
- Dagnelie, P. and Mariotti, F. (2017), *1 - Vegetarian Diets: Definitions and Pitfalls in Interpreting Literature on Health Effects of Vegetarianism. Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention.*, Academic Press., F. Mariotti.
- Darmon, N. and Drewnowski, A. (2008), "Does social class predict diet quality?", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 87 No. 5, pp. 1107–1117.
- Das, J.K., Salam, R.A., Mahmood, S.B., Moin, A., Kumar, R., Mukhtar, K., Lassi, Z.S., *et al.* (2019), "Food fortification with multiple micronutrients: impact on health outcomes in general population", *The Cochrane Database of Systematic Reviews*, Vol. 12.
- De Gavelle, E., Huneau, J.-F., Bianchi, C.M., Verger, E.O. and 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*, Vol. 9 No. 12, p. 1333.
- Derbyshire, E. (2020), "Plant-Based Diets-Environmental Benefits but Better Awareness Needed to Prevent Future Micronutrient Shortcomings – SkepticMed Publishers", available at: <http://www.skepticmedpublishers.com/plant-based-diets-environmental-benefits-but-better-awareness-needed-to-prevent-future-micronutrient-shortcomings/> (accessed 23 March 2022).
- Derbyshire, E.J. (2017), "Flexitarian Diets and Health: A Review of the Evidence-Based Literature", *Frontiers in Nutrition*, Vol. 3.

Dietary Guidelines Advisory Committee. (2020), *Scientific Report of the 2020 Dietary Guidelines Advisory Committee: Advisory Report to the Secretary of Agriculture and the Secretary of Health and Human Services*, U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Washington, DC, available at: https://www.dietaryguidelines.gov/sites/default/files/2020-07/ScientificReport_of_the_2020DietaryGuidelinesAdvisoryCommittee_first-print.pdf (accessed 22 June 2021).

Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein, and Amino Acids. (2005), , Institute of Medicine, Washington, D.C, available at: <https://doi.org/10.17226/10490>. (accessed 22 March 2022).

Dietary Reference Values for Nutrients Summary Report. (2017), , The European Food Safety Authority (EFSA), available at: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/sp.efsa.2017.e15121> (accessed 22 June 2021).

Dinesh, D., Hegger, D.L.T., Klerkx, L., Vervoort, J., Campbell, B.M. and Driessen, P.P.J. (2021), “Enacting theories of change for food systems transformation under climate change”, *Global Food Security*, Vol. 31, p. 100583.

van Dooren, C., Marinussen, M., Blonk, H., Aiking, H. and Vellinga, P. (2014), “Exploring dietary guidelines based on ecological and nutritional values: A comparison of six dietary patterns”, *Food Policy*, Vol. 44, pp. 36–46.

Dubuisson, C., Dufour, A., Carrillo, S., Drouillet-Pinard, P., Havard, S. and Volatier, J.-L. (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 Nutrition*, Vol. 22 No. 4, pp. 584–600.

Dubuisson, C., Lioret, S., Touvier, M., Dufour, A., Calamassi-Tran, G., Volatier, J.-L. and Lafay, L. (2010), “Trends in food and nutritional intakes of French adults from 1999 to 2007: results from the INCA surveys”, *British Journal of Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. 103 No. 7, pp. 1035–1048.

Dussiot, A., Fouillet, H., Wang, J., Salomé, M., Huneau, J.-F., Kesse-Guyot, E. and Mariotti, F. (2021), “Modeled healthy eating patterns are largely constrained by currently estimated requirements for bioavailable iron and zinc—a diet optimization study in French adults”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, available at: <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab373>.

- Eckl, M.R., Biesbroek, S., van't Veer, P. and Geleijnse, J.M. (2021), "Replacement of Meat with Non-Meat Protein Sources: A Review of the Drivers and Inhibitors in Developed Countries", *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 10, p. 3602.
- En France, la consommation de viande se modifie fortement entre 1960 et 2018*, No. 4. (2020), , Agreste, p. 5.
- Engelmann, G., Marsall, M., Skoda, E.-M., Knoll-Pientka, N., Bäuerle, L., Stroebele-Benschop, N., Teufel, M., et al. (2021), "Development and Validation of the General Dietary Behavior Inventory (GDBI) in Scope of International Nutrition Guidelines", *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 4, p. 1328.
- English, L.K., Ard, J.D., Bailey, R.L., Bates, M., Bazzano, L.A., Boushey, C.J., Brown, C., et al. (2021), "Evaluation of Dietary Patterns and All-Cause Mortality: A Systematic Review", *JAMA Network Open*, Vol. 4 No. 8, p. e2122277.
- Esteve-Llorens, X., Darriba, C., Moreira, M.T., Feijoo, G. and González-García, S. (2019), "Towards an environmentally sustainable and healthy Atlantic dietary pattern: Life cycle carbon footprint and nutritional quality", *Science of The Total Environment*, Vol. 646, pp. 704–715.
- Etude de santé sur l'environnement, la biosurveillance, l'activité physique et la nutrition (Esteban 2014-2016). Volet Nutrition. Chapitre Dosages biologiques : vitamines et minéraux.* (2019a), , Santé Publique France, Saint-Maurice, France, p. 61.
- EU Agricultural Outlook for Markets and Income, 2019-2030*, collective expertise report. (2019), , European Commission, DG Agriculture and Rural Development, Brussels, p. 94.
- Eustachio Colombo, P., Elinder, L.S., Lindroos, A.K. and Parlesak, A. (2021), "Designing Nutritionally Adequate and Climate-Friendly Diets for Omnivorous, Pescatarian, Vegetarian and Vegan Adolescents in Sweden Using Linear Optimization", *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 8, p. 2507.
- Fadnes, L.T., Økland, J.-M., Haaland, Ø.A. and Johansson, K.A. (2022), "Estimating impact of food choices on life expectancy: A modeling study", *PLOS Medicine*, Public Library of Science, Vol. 19 No. 2, p. e1003889.
- Falkingham, M., Abdelhamid, A., Curtis, P., Fairweather-Tait, S., Dye, L. and Hooper, L. (2010), "The effects of oral iron supplementation on cognition in older children and adults: a systematic review and meta-analysis", *Nutrition Journal*, Vol. 9, p. 4.

- Fanzo, J. and Davis, C. (2021a), “Nutritious Foods, Healthy Diets, and Contributions to Health”, in Fanzo, J. and Davis, C. (Eds.), *Global Food Systems, Diets, and Nutrition: Linking Science, Economics, and Policy*, Springer International Publishing, Cham, pp. 41–50.
- Fanzo, J. and Davis, C. (2021b), “Sustainable Diets: Aligning Food Systems and the Environment”, in Fanzo, J. and Davis, C. (Eds.), *Global Food Systems, Diets, and Nutrition: Linking Science, Economics, and Policy*, Springer International Publishing, Cham, pp. 155–168.
- FAOSTAT. (2018), “Food Supply - Livestock and Fish Primary Equivalent.”, available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/CL> (accessed 3 October 2022).
- Ferguson, J.J., Oldmeadow, C., Mishra, G.D. and Garg, M.L. (2021), “Plant-based dietary patterns are associated with lower body weight, BMI and waist circumference in older Australian women”, *Public Health Nutrition*, Cambridge University Press, pp. 1–14.
- Ferrari, M., Benvenuti, L., Rossi, L., De Santis, A., Sette, S., Martone, D., Piccinelli, R., *et al.* (2020), “Could Dietary Goals and Climate Change Mitigation Be Achieved Through Optimized Diet? The Experience of Modeling the National Food Consumption Data in Italy”, *Frontiers in Nutrition*, Vol. 7.
- Fogelholm, M., Kanerva, N. and Männistö, S. (2015), “Association between red and processed meat consumption and chronic diseases: the confounding role of other dietary factors”, *European Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 69 No. 9, pp. 1060–1065.
- Food, Nutrition, Physical Activity, and the Prevention of Cancer: A Global Perspective. A Summary of the Third Expert Report.* (2018a), , World Cancer Research, Fund, et Research American Institute for Cancer, p. 114.
- Foster, M., Chu, A., Petocz, P. and Samman, S. (2013), “Effect of vegetarian diets on zinc status: a systematic review and meta-analysis of studies in humans”, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, Vol. 93 No. 10, pp. 2362–2371.
- Foster, M. and Samman, S. (2017), “38 - Implications of a Plant-Based Diet on Zinc Requirements and Nutritional Status”, in Mariotti, F. (Ed.), *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*, Academic Press, pp. 683–713.
- Fresán, U. and Sabaté, J. (2019), “Vegetarian Diets: Planetary Health and Its Alignment with Human Health”, *Advances in Nutrition*, Vol. 10 No. Supplement_4, pp. S380–S388.

- Friel, S., Dangour, A.D., Garnett, T., Lock, K., Chalabi, Z., Roberts, I., Butler, A., *et al.* (2009), “Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: food and agriculture”, *The Lancet*, Elsevier, Vol. 374 No. 9706, pp. 2016–2025.
- Fukagawa, N.K., McKillop, K., Pehrsson, P.R., Moshfegh, A., Harnly, J. and Finley, J. (2021), “USDA’s FoodData Central: What is it? and Why is it needed today?”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, p. nqab397.
- Fulgoni, V.L. (2008), “Current protein intake in America: analysis of the National Health and Nutrition Examination Survey, 2003-2004”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 87 No. 5, pp. 1554S-1557S.
- Ganz, T. (2013), “Systemic iron homeostasis”, *Physiological Reviews*, Vol. 93 No. 4, pp. 1721–1741.
- Gardner, C.D., Hartle, J.C., Garrett, R.D., Offringa, L.C. and Wasserman, A.S. (2019), “Maximizing the intersection of human health and the health of the environment with regard to the amount and type of protein produced and consumed in the United States”, *Nutrition Reviews*, Vol. 77 No. 4, pp. 197–215.
- Gassie, J. and Oudin, B. (2017), *Comportements Alimentaires de Demain : Les Tendances à 2025 et Leur Diffusion Aux Acteurs de La Filière*, No. 97, Centre d’études et de prospective, p. 4.
- de Gavelle, E., Davidenko, O., Fouillet, H., Delarue, J., Darcel, N., Huneau, J.-F. and 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*, Vol. 142, p. 104345.
- de Gavelle, E., Huneau, J.-F., Fouillet, H. and 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*, Vol. 149 No. 3, pp. 488–496.
- de Gavelle, E., Huneau, J.-F. and Mariotti, F. (2018), “Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population”, *Nutrients*, Vol. 10 No. 2, p. 226.
- de Gavelle, E., Leroy, P., Perrimon, M., Huneau, J.-F., Sirot, V., Orset, C., Fouillet, H., *et al.* (2020), “Modeled gradual changes in protein intake to increase nutrient adequacy lead to greater sustainability when systematically targeting an increase in the share of plant protein”, *Climatic Change*, Vol. 161 No. 1, pp. 129–149.

- Gazan, R., Brouzes, C.M.C., Vieux, F., Maillot, M., Lluch, A. and Darmon, N. (2018), “Mathematical Optimization to Explore Tomorrow’s Sustainable Diets: A Narrative Review”, *Advances in Nutrition*, Vol. 9 No. 5, pp. 602–616.
- Gazan, R., Maillot, M., Reboul, E. and Darmon, N. (2021), “Pulses Twice a Week in Replacement of Meat Modestly Increases Diet Sustainability”, *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 9, p. 3059.
- GBD. (2022), “GBD Results Tool”, available at: <http://ghdx.healthdata.org/gbd-results-tool> (accessed 29 March 2022).
- GBD Risk Factors Collaborators. (2020), “Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019”, *Lancet (London, England)*, Vol. 396 No. 10258, pp. 1223–1249.
- Gehring, J., Touvier, M., Baudry, J., Julia, C., Buscail, C., Srour, B., Hercberg, S., *et al.* (2021), “Consumption of Ultra-Processed Foods by Pesco-Vegetarians, Vegetarians, and Vegans: Associations with Duration and Age at Diet Initiation”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 151 No. 1, pp. 120–131.
- Gibson, R.S., Raboy, V. and King, J.C. (2018), “Implications of phytate in plant-based foods for iron and zinc bioavailability, setting dietary requirements, and formulating programs and policies”, *Nutrition Reviews*, Vol. 76 No. 11, pp. 793–804.
- Gómez-Donoso, C., Martínez-González, M.Á., Martínez, J.A., Gea, A., Sanz-Serrano, J., Perez-Cueto, F.J.A. and Bes-Rastrollo, M. (2019), “A Provegetarian Food Pattern Emphasizing Preference for Healthy Plant-Derived Foods Reduces the Risk of Overweight/Obesity in the SUN Cohort”, *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 11 No. 7, p. 1553.
- Grasso, A.C., Olthof, M.R., van Dooren, C., Broekema, R., Visser, M. and Brouwer, I.A. (2021), “Protein for a Healthy Future: How to Increase Protein Intake in an Environmentally Sustainable Way in Older Adults in the Netherlands”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 151 No. 1, pp. 109–119.
- Green, R., Milner, J., Dangour, A.D., Haines, A., Chalabi, Z., Markandya, A., Spadaro, J., *et al.* (2015), “The potential to reduce greenhouse gas emissions in the UK through healthy and realistic dietary change”, *Climatic Change*, Vol. 129 No. 1, pp. 253–265.

- Greenwood, D.C., Cade, J.E., Draper, A., Barrett, J.H., Calvert, C. and Greenhalgh, A. (2000), “Seven unique food consumption patterns identified among women in the UK Women’s Cohort Study”, *European Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 54 No. 4, pp. 314–320.
- Grieger, J.A., Johnson, B.J., Wycherley, T.P. and Golley, R.K. (2017), “Evaluation of Simulation Models that Estimate the Effect of Dietary Strategies on Nutritional Intake: A Systematic Review”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 147 No. 5, pp. 908–931.
- Griffin, I.J. and Rogido, M. (2021), “Temporal Trends in Iron Intake, Iron Fortification, and Iron Deficiency”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 151 No. 7, pp. 1686–1687.
- Grosso, G., Micek, A., Godos, J., Pajak, A., Sciacca, S., Galvano, F. and Boffetta, P. (2017), “Health risk factors associated with meat, fruit and vegetable consumption in cohort studies: A comprehensive meta-analysis”, edited by Ahmad, A. *PLOS ONE*, Vol. 12 No. 8, p. e0183787.
- Guasch-Ferré, M., Satija, A., Blondin, S.A., Janiszewski, M., Emlen, E., O’Connor, L.E., Campbell, W.W., *et al.* (2019), “Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials of Red Meat Consumption in Comparison With Various Comparison Diets on Cardiovascular Risk Factors”, *Circulation*, American Heart Association, Vol. 139 No. 15, pp. 1828–1845.
- Halkjær, J., Olsen, A., Bjerregaard, L.J., Deharveng, G., Tjønneland, A., Welch, A.A., Crowe, F.L., *et al.* (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*, Nature Publishing Group, Vol. 63 No. 4, pp. S16–S36.
- Hallberg, L., Brune, M. and Rossander, L. (1989), “Iron absorption in man: ascorbic acid and dose-dependent inhibition by phytate”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 49 No. 1, pp. 140–144.
- Hallberg, L. and Hulthén, L. (2000), “Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 71 No. 5, pp. 1147–1160.
- Harguess, J.M., Crespo, N.C. and Hong, M.Y. (2020), “Strategies to reduce meat consumption: A systematic literature review of experimental studies”, *Appetite*, Vol. 144.
- He, P., Feng, K., Baiocchi, G., Sun, L. and Hubacek, K. (2021), “Shifts towards healthy diets in the US can reduce environmental impacts but would be unaffordable for poorer minorities”, *Nature Food*, pp. 1–9.

- Heinrich Böll Stiftung. (2021), *Meat Atlas 2021*, Heinrich Böll Foundation, Friends of the Earth Europe, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland, available at: <https://www.boell.de/en/2021/01/06/fleischatlas-2021> (accessed 10 March 2022).
- Hemler, E. and Hu, F. (2019a), “Plant-Based Diets for Personal, Population, and Planetary Health”, *Advances in Nutrition*, Vol. 10 No. Supplement_4, pp. S275–S283.
- Hemler, E. and Hu, F. (2019b), “Plant-Based Diets for Cardiovascular Disease Prevention: All Plant Foods Are Not Created Equal”, *Current Atherosclerosis Reports*, Vol. 21 No. 5, p. 18.
- Henchion, M., Moloney, A.P., Hyland, J., Zimmermann, J. and McCarthy, S. (2021), “Review: Trends for meat, milk and egg consumption for the next decades and the role played by livestock systems in the global production of proteins”, *Animal*, Vol. 15, p. 100287.
- Hercberg, S., Castetbon, K., Czernichow, S., Malon, A., Mejean, C., Kesse, E., Touvier, M., *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*, Vol. 10, p. 242.
- Hidayat, K., Chen, J.-S., Wang, H.-P., Wang, T.-C., Liu, Y.-J., Zhang, X.-Y., Rao, C.-P., *et al.* (2022), “Is replacing red meat with other protein sources associated with lower risks of coronary heart disease and all-cause mortality? A meta-analysis of prospective studies”, *Nutrition Reviews*, p. nuac017.
- Hoy, M.K., Murayi, T. and Moshfegh, A.J. (2022), “Diet Quality and Food Intakes among US Adults by Level of Animal Protein Intake, What We Eat in America, NHANES 2015-2018”, *Current Developments in Nutrition*, Vol. 6 No. 5, p. nzac035.
- Hu, F.B., Otis, B.O. and McCarthy, G. (2019), “Can Plant-Based Meat Alternatives Be Part of a Healthy and Sustainable Diet?”, *JAMA*, Vol. 322 No. 16, pp. 1547–1548.
- Huang, Y., Cao, D., Chen, Z., Chen, B., Li, J., Guo, J., Dong, Q., *et al.* (2021), “Red and processed meat consumption and cancer outcomes: Umbrella review”, *Food Chemistry*, p. 129697.
- Hung, Y., Hieke, S., Grunert, K.G. and Verbeke, W. (2019), “Setting Policy Priorities for Front-of-Pack Health Claims and Symbols in the European Union: Expert Consensus Built by Using a Delphi Method”, *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 11 No. 2, p. 403.
- Hunt, J.R. (2003), “Bioavailability of iron, zinc, and other trace minerals from vegetarian diets”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 78 No. 3, pp. 633S-639S.

- Hunt, J.R., Zito, C.A. and Johnson, L.K. (2009), "Body iron excretion by healthy men and women", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 89 No. 6, pp. 1792–1798.
- IHME. (2019), "GBD Compare | IHME Viz Hub. Diet high in processed meat.", Institute for Health Metrics and Evaluation, , available at: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-compare/> (accessed 30 March 2022).
- Implementing Fiscal and Pricing Policies to Promote Healthy Diets - a Review of Contextual Factors.* (2021a), , World Health Organization (WHO) - Nutrition and Food Safety, Geneva, Switzerland, p. 69.
- Interbev. (2022), "Consommation équilibrée et raisonnable de viande", Interbev, interprofession bétail & viande, , available at: <https://www.interbev.fr/enjeux-societaux/nutrition-alimentation-qualite/consommation-equilibree-et-raisonnable-de-viande/> (accessed 5 November 2022).
- Iron and Health.* (2010), , Scientific Advisory Committee on Nutrition, London, United Kingdom, available at: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/339309/SACN_Iron_and_Health_Report.pdf (accessed 26 August 2021).
- Jarmul, S., Dangour, A.D., Green, R., Liew, Z., Haines, A. and Scheelbeek, P.F. (2020), "Climate change mitigation through dietary change: a systematic review of empirical and modelling studies on the environmental footprints and health effects of `sustainable diets`", *Environmental Research Letters*, IOP Publishing, Vol. 15 No. 12, p. 123014.
- Jayedi, A., Soltani, S., Abdolshahi, A. and Shab-Bidar, S. (2020), "Healthy and unhealthy dietary patterns and the risk of chronic disease: an umbrella review of meta-analyses of prospective cohort studies", *British Journal of Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. 124 No. 11, pp. 1133–1144.
- Jennings, A., Tang, J., Gillings, R., Perfecto, A., Dutton, J., Speakman, J., Fraser, W.D., *et al.* (2020), "Changing from a Western to a Mediterranean-style diet does not affect iron or selenium status: results of the New Dietary Strategies Addressing the Specific Needs of the Elderly Population for Healthy Aging in Europe (NU-AGE) 1-year randomized clinical trial in elderly Europeans", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 111 No. 1, pp. 98–109.
- Jin, S. and Je, Y. (2021), "Dairy Consumption and Total Cancer and Cancer-Specific Mortality: A Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies", *Advances in Nutrition*, p. nmab135.
- Johnston, J.L., Fanzo, J.C. and Cogill, B. (2014), "Understanding Sustainable Diets: A Descriptive Analysis of the Determinants and Processes That Influence Diets and Their Impact on Health, Food Security, and Environmental Sustainability", *Advances in Nutrition*, Vol. 5 No. 4, pp. 418–429.

- Joulié, C. (2021), “Risques et bénéfices du végétarisme et du végétalisme”, *Actualités Pharmaceutiques*, Vol. 60 No. 602, pp. 23–27.
- Julia, C., Leroy, P., Adjibade, M., Assmann, K.E., Touvier, M., Hercberg, S., Soler, L.-G., *et al.* (2021), “Public health potential of guidelines-based dietary scores for non-communicable diseases mortality prevention: simulation study using the PRIME model”, *Public Health Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. Online Early, pp. 1–24.
- Kabisch, S., Wenschuh, S., Buccellato, P., Spranger, J. and Pfeiffer, A.F.H. (2021), “Affordability of Different Isocaloric Healthy Diets in Germany—An Assessment of Food Prices for Seven Distinct Food Patterns”, *Nutrients*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 13 No. 9, p. 3037.
- Kanerva, M. (2013), *Meat Consumption in Europe: Issues, Trends and Debates*, Vol. 187, Universität Bremen, Forschungszentrum Nachhaltigkeit (artec), Bremen.
- Katz, D.L., Doughty, K.N., Geagan, K., Jenkins, D.A. and Gardner, C.D. (2019), “Perspective: The Public Health Case for Modernizing the Definition of Protein Quality”, *Advances in Nutrition*, Vol. 10 No. 5, pp. 755–764.
- Keaver, L., Ruan, M., Chen, F., Du, M., Ding, C., Wang, J., Shan, Z., *et al.* (2021), “Plant- and animal-based diet quality and mortality among US adults: a cohort study”, *British Journal of Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. 125 No. 12, pp. 1405–1415.
- Kesse-Guyot, E., Chaltiel, D., Wang, J., Pointereau, P., Langevin, B., Allès, B., Rebouillat, P., *et al.* (2020), “Sustainability analysis of French dietary guidelines using multiple criteria”, *Nature Sustainability*, Vol. 3 No. 5, pp. 377–385.
- Kesse-Guyot, E., Fouillet, H., Baudry, J., Dussiot, A., Langevin, B., Allès, B., Rebouillat, P., *et al.* (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*, Vol. 789, p. 147901.
- Kesse-Guyot, E., Rebouillat, P., Brunin, J., Langevin, B., Allès, B., Touvier, M., Hercberg, S., *et al.* (2021), “Environmental and nutritional analysis of the EAT-Lancet diet at the individual level: insights from the NutriNet-Santé study”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 296, p. 126555.
- Kim, K., Hyeon, J., Lee, S.A., Kwon, S.O., Lee, H., Keum, N., Lee, J., *et al.* (2017), “Role of Total, Red, Processed, and White Meat Consumption in Stroke Incidence and Mortality: A Systematic Review and Meta-

- Analysis of Prospective Cohort Studies”, *Journal of the American Heart Association: Cardiovascular and Cerebrovascular Disease*, Vol. 6 No. 9, available at:<https://doi.org/10.1161/JAHA.117.005983>.
- Knuppel, A., Papier, K., Key, T.J. and Travis, R.C. (2019), “EAT-Lancet score and major health outcomes: the EPIC-Oxford study”, *The Lancet*, Elsevier, Vol. 394 No. 10194, pp. 213–214.
- Kramer, G. (2016), “Optimized sustainable diets for 2030: a comparison of different algorithms and the robustness of outcomes”, Blonk Consultants, The Netherlands, 22 August, available at: www.blonkconsultants.nl/iufost2016.
- Kramer, G.F., Tyszler, M., Veer, P.V. and Blonk, H. (2017), “Decreasing the overall environmental impact of the Dutch diet: how to find healthy and sustainable diets with limited changes”, *Public Health Nutrition*, Vol. 20 No. 9, pp. 1699–1709.
- Kramer, G.F.H., Martinez, E.V., Espinoza-Orias, N.D., Cooper, K.A., Tyszler, M. and Blonk, H. (2018), “Comparing the Performance of Bread and Breakfast Cereals, Dairy, and Meat in Nutritionally Balanced and Sustainable Diets”, *Frontiers in Nutrition*, Vol. 5 No. 51, p. 9.
- Kromhout, D., Keys, A., Aravanis, C., Buzina, R., Fidanza, F., Giampaoli, S., Jansen, A., *et al.* (1989), “Food consumption patterns in the 1960s in seven countries”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 49 No. 5, pp. 889–894.
- Kwasny, T., Dobernig, K. and Riefler, P. (2021), “Towards reduced meat consumption: A systematic literature review of intervention effectiveness, 2001–2019”, *Appetite*, p. 105739.
- La consommation de viande en France en 2020*, Synthèses conjoncturelles No. 376. (2021), , FranceAgriMer, p. 11.
- La qualité des aliments d'origine animale selon les conditions de production et de transformation*, Expertise scientifique collective. (2020), , INRAE, p. 112.
- Laine, J.E., Huybrechts, I., Gunter, M.J., Ferrari, P., Weiderpass, E., Tsilidis, K., Aune, D., *et al.* (2021), “Co-benefits from sustainable dietary shifts for population and environmental health: an assessment from a large European cohort study”, *The Lancet Planetary Health*, Elsevier, Vol. 0 No. 0, available at:[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00250-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00250-3).
- Lapping, K., Marsh, D.R., Rosenbaum, J., Swedberg, E., Sternin, J., Sternin, M. and Schroeder, D.G. (2002), “The Positive Deviance Approach: Challenges and Opportunities for the Future”, *Food and Nutrition Bulletin*, SAGE Publications Inc, Vol. 23 No. 4_suppl_1, pp. 128–135.

- Lebredonchel, L. (2021), *Sociologie des représentations alimentaires et de l'éducation à l'alimentation, pour une alimentation durable dans le contexte de la transition épidémiologique. Une étude de cas au sein de quatre écoles élémentaires*, Spécialité Sociologie, Démographie, Université de Caen Normandie, available at: <http://www.espace-ressources.org/wp-content/uploads/2021/07/These-de-Louis-LEBREDONCHEL.pdf> (accessed 27 September 2021).
- Lecerf, J.-M. and Schlienger, J.-L. (2020), *Nutrition préventive et thérapeutique*, 2e édition., Elsevier/Masson, available at: <https://www.unitheque.com/nutrition-preventive-therapeutique/elsevier-masson/Livre/150488> (accessed 5 April 2022).
- Lichtenstein, A.H., Appel, L.J., Vadiveloo, M., Hu, F.B., Kris-Etherton, P.M., Rebholz, C.M., Sacks, F.M., *et al.* (2021), "2021 Dietary Guidance to Improve Cardiovascular Health: A Scientific Statement From the American Heart Association", *Circulation*, American Heart Association, Vol. 0 No. 0, p. CIR.000000000001031.
- Lonnie, M. and Johnstone, A.M. (2020), "The public health rationale for promoting plant protein as an important part of a sustainable and healthy diet", *Nutrition Bulletin*, Vol. 45 No. 3, pp. 281–293.
- Lucas, E., Guo, M. and Guillén-Gosálbez, G. (2021), "Optimising diets to reach absolute planetary environmental sustainability through consumers", *Sustainable Production and Consumption*, available at: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.07.003>.
- Macdiarmid, J.I., Kyle, J., Horgan, G.W., Loe, J., Fyfe, C., Johnstone, A. and McNeill, G. (2012), "Sustainable diets for the future: Can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet?", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 96 No. 3, pp. 632–639.
- Magkos, F., Tetens, I., Gjedsted Bügel, S. and Felby, C. (2019), "Perspective on the Transition to Plant-Based Diets: a Diet Change May Attenuate Climate Change, but Can It Also Attenuate Obesity and Chronic Disease Risk? | Advances in Nutrition | Oxford Academic", *American Society for Nutrition*.
- Mariotti, F. (2016), "Chapter 2 - Protein Intake Throughout Life and Current Dietary Recommendations", in Dardevet, D. (Ed.), *The Molecular Nutrition of Amino Acids and Proteins*, Academic Press, Boston, pp. 13–25.
- Mariotti, F. (Ed.). (2017), *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*, Elsevier/Academic Press, an imprint of Elsevier, London.

- Mariotti, F. and Gardner, C.D. (2019), "Dietary Protein and Amino Acids in Vegetarian Diets—A Review", *Nutrients*, Vol. 11 No. 11, p. 2661.
- Mariotti, F. and Gardner, C.D. (2020), "Adéquation de l'apport en protéines et acides aminés dans les régimes végétariens", *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, Vol. 55 No. 2, pp. 66–81.
- Mariotti, F., Havard, S., Morise, A., Nadaud, P., Sirot, V., Wetzler, S. and Margaritis, I. (2021), "Perspective: Modeling Healthy Eating Patterns for Food-Based Dietary Guidelines-Scientific Concepts, Methodological Processes, Limitations, and Lessons", *Advances in Nutrition*, Vol. 12 No. 3, pp. 590–599.
- Martin, M. and Brandão, M. (2017), "Evaluating the Environmental Consequences of Swedish Food Consumption and Dietary Choices", *Sustainability*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Vol. 9 No. 12, p. 2227.
- Martini, D., Godos, J., Marventano, S., Tieri, M., Ghelfi, F., Titta, L., Lafranchi, A., *et al.* (2021), "Nut and legume consumption and human health: an umbrella review of observational studies", *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, Taylor & Francis, Vol. 0 No. 0, pp. 1–8.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P., Pirani, A., *et al.* (2018), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland, available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/> (accessed 12 February 2019).
- Mausser, H., Grodzevich, O., Romanko, O., Ding, Y., Gregov, S., Halevy, I., Kavazovic, Z., *et al.* (2006), "Normalization and Other Topics in MultiObjective Optimization", *Fields-MITACS Industrial Problem Solving Workshop and the Algorithmics*, p. pp.59-101.
- Mazac, R., Meinilä, J., Korkalo, L., Järviö, N., Jalava, M. and Tuomisto, H.L. (2022), "Incorporation of novel foods in European diets can reduce global warming potential, water use and land use by over 80%", *Nature Food*, Nature Publishing Group, Vol. 3 No. 4, pp. 286–293.
- McMichael, A.J., Powles, J.W., Butler, C.D. and Uauy, R. (2007), "Food, livestock production, energy, climate change, and health", *The Lancet*, Vol. 370 No. 9594, pp. 1253–1263.

- Meat, Fish and Dairy Products and the Risk of Cancer. Diet, Nutrition, Physical Activity and Cancer: A Global Perspective.*, CUP Expert Report. (2018b), , World Cancer Research Fund, London, United Kingdom, p. 78.
- Meat Production and Consumption (in Europe) and Public Health : An Exploration.* (2021), , European Public Health Alliance, p. 74 p.
- Membré, J.M., Santillana Farakos, S. and Nauta, M. (2021), “Risk-benefit analysis in food safety and nutrition”, *Current Opinion in Food Science*, Vol. 39, pp. 76–82.
- Mertens, E., Kaptijn, G., Kuijsten, A., van Zanten, H., Geleijnse, J.M. and van ’t Veer, P. (2019), “SHARP-Indicators Database towards a public database for environmental sustainability”, *Data in Brief*, Vol. 27, p. 104617.
- Mertens, E., Van’t Veer, P., Hiddink, G.J., Steijns, J.M. and Kuijsten, A. (2017), “Operationalising the health aspects of sustainable diets: a review”, *Public Health Nutrition*, Vol. 20 No. 4, pp. 739–757.
- Miller, L.V., Krebs, N.F. and Hambidge, K.M. (2007), “A Mathematical Model of Zinc Absorption in Humans As a Function of Dietary Zinc and Phytate”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 137 No. 1, pp. 135–141.
- Miller, L.V., Krebs, N.F. and Hambidge, K.M. (2013), “Mathematical model of zinc absorption: effects of dietary calcium, protein and iron on zinc absorption”, *British Journal of Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. 109 No. 4, pp. 695–700.
- Miller, V., Micha, R., Choi, E., Karageorgou, D., Webb, P. and Mozaffarian, D. (2022), “Evaluation of the Quality of Evidence of the Association of Foods and Nutrients With Cardiovascular Disease and Diabetes: A Systematic Review”, *JAMA Network Open*, Vol. 5 No. 2, p. e2146705.
- Monteiro, C.A., Cannon, G., Moubarac, J.-C., Levy, R.B., Louzada, M.L.C. and Jaime, P.C. (2018), “The UN Decade of Nutrition, the NOVA food classification and the trouble with ultra-processing”, *Public Health Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. 21 No. 1, pp. 5–17.
- Moretti, D. (2017a), “Plant-Based Diets and Iron Status”, *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*, Academic Press., pp. 715–727.
- Moretti, D. (2017b), *39 - Plant-Based Diets and Iron Status. Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention.*, Academic Press., F. Mariotti.

- Murakami, K. and Livingstone, M.B.E. (2018), "Greenhouse gas emissions of self-selected diets in the UK and their association with diet quality: is energy under-reporting a problem?", *Nutrition Journal*, Vol. 17 No. 1, p. 27.
- Murray, C.J.L. and Lopez, A.D. (2013), "Measuring the Global Burden of Disease", *New England Journal of Medicine*, Vol. 369 No. 5, pp. 448–457.
- Neufingerl, N. and Eilander, A. (2022), "Nutrient Intake and Status in Adults Consuming Plant-Based Diets Compared to Meat-Eaters: A Systematic Review", *Nutrients*, Vol. 14 No. 1, p. 29.
- Neveu, A. (2021), "Nourrir le monde en 2050 : un défi qui reste bien réel", *Paysans & société*, Vol. N° 387 No. 3, pp. 35–41.
- Nicholls, J. and Drewnowski, A. (2021), "Toward Sociocultural Indicators of Sustainable Healthy Diets", *Sustainability*, Vol. 13 No. 13, p. 7226.
- Niles, M.T., Ahuja, R., Barker, T., Esquivel, J., Gutterman, S., Heller, M.C., Mango, N., *et al.* (2018), "Climate change mitigation beyond agriculture: a review of food system opportunities and implications", *Renewable Agriculture and Food Systems*, Vol. 33 No. 3, pp. 297–308.
- Nirmala Prasadi V. and Joye, I.J. (2020), "Dietary Fibre from Whole Grains and Their Benefits on Metabolic Health", *Nutrients*, Vol. 12 No. 10, p. 3045.
- Niva, M., Vainio, A. and Jallinoja, P. (2017), *10 - Barriers to Increasing Plant Protein Consumption in Western Populations. Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention.*, Academic Press., F. Mariotti.
- Noguerol, A.T., Pagán, M.J., García-Segovia, P. and Varela, P. (2021), "Green or clean? Perception of clean label plant-based products by omnivorous, vegan, vegetarian and flexitarian consumers", *Food Research International*, Vol. 149, p. 110652.
- Nordic Nutrition Recommendations. 2012. Integrating Nutrition and Physical Activity.* (2014), , Nordic Council of Minister, Copenhagen, Denmark, available at: doi.org/10.6027/Nord2014-002 (accessed 1 September 2021).
- Nungesser, F. and Winter, M. (2021), "Meat and social change", *Österreichische Zeitschrift Für Soziologie*, available at: <https://doi.org/10.1007/s11614-021-00453-0>.
- Nutritional values of meats, 2006-2009.* (2006), , The French Meat Information Center & INRAE, available at: <http://www.lessentiellesviandes-pro.org/pdf/PDF-tous%20morceaux.pdf> (accessed 12 July 2021).

- OECD and FAO. (2020), *OECD-FAO Agricultural Outlook 2020-2029*, FAO and OECD, Rome, Italy, available at: <https://doi.org/10.1787/1112c23b-en>.
- Osei-Owusu, A.K., Towa, E. and Thomsen, M. (2022), "Exploring the pathways towards the mitigation of the environmental impacts of food consumption", *Science of The Total Environment*, Vol. 806, p. 150528.
- Our World in Data. (2017), , available at: <https://ourworldindata.org/> (accessed 20 January 2022).
- Pan, A., Sun, Q., Bernstein, A.M., Manson, J.E., Willett, W.C. and Hu, F.B. (2013), "Changes in red meat consumption and subsequent risk of type 2 diabetes mellitus: three cohorts of US men and women", *JAMA Internal Medicine*, Vol. 173 No. 14, pp. 1328–1335.
- Papier, K., Knuppel, A., Syam, N., Jebb, S.A. and Key, T.J. (2021), "Meat consumption and risk of ischemic heart disease: A systematic review and meta-analysis", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Vol. 0 No. 0, pp. 1–12.
- Papp, R.-E., Hasenegger, V., Ekmekcioglu, C. and Schwingshackl, L. (2021), "Association of poultry consumption with cardiovascular diseases and all-cause mortality: a systematic review and dose response meta-analysis of prospective cohort studies", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Vol. 0 No. 0, pp. 1–22.
- Pasricha, S.-R., Low, M., Thompson, J., Farrell, A. and De-Regil, L.-M. (2014), "Iron supplementation benefits physical performance in women of reproductive age: a systematic review and meta-analysis", *The Journal of Nutrition*, Vol. 144 No. 6, pp. 906–914.
- Perignon, M., Barré, T., Gazan, R., Amiot, M.-J. and Darmon, N. (2016), "The bioavailability of iron, zinc, protein and vitamin A is highly variable in French individual diets: Impact on nutrient inadequacy assessment and relation with the animal-to-plant ratio of diets | Elsevier Enhanced Reader", *Elsevier*.
- Perignon, M., Masset, G., Ferrari, G., Barré, T., Vieux, F., Maillot, M., Amiot, M.-J., *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 Nutrition*, Cambridge University Press, Vol. 19 No. 14, pp. 2662–2674.
- Phillips, S.M., Fulgoni, V.L., Heaney, R.P., Nicklas, T.A., Slavin, J.L. and Weaver, C.M. (2015), "Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 101 No. 6, pp. 1346S-1352S.

Pimentel, D. and Pimentel, M. (2003), "Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 78 No. 3, pp. 660S-663S.

Plant-Based Diets and Their Impact on Health, Sustainability and the Environment: A Review of the Evidence, No. WHO/EURO:2021-4007-43766-61591. (2021b), , World Health Organization. Regional Office for Europe., available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/349086> (accessed 22 January 2022).

Pointereau, P., Langevin, B. and Gimaret, M. (2012), "DIALECTE, a comprehensive and quick tool to assess the agro-environmental performance of farms.", *Undefined*, available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/DIALECTE%2C-a-comprehensive-and-quick-tool-to-assess-Pointereau-Langevin/33db4cdf6eef55ee53c52c020e68793aedeb7456> (accessed 12 April 2022).

Poore, J. and Nemecek, T. (2018), "Reducing food's environmental impacts through producers and consumers", *Science*, American Association for the Advancement of Science, Vol. 360 No. 6392, pp. 987–992.

Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition : Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation, Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition. (2007), , FAO/WHO/UNU, available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43411> (accessed 15 October 2021).

Raiten, D.J., Combs, G.F., Jr, Steiber, A.L. and Bremer, A.A. (2021), "Perspective: Nutritional Status as a Biological Variable (NABV): Integrating Nutrition Science into Basic and Clinical Research and Care", *Advances in Nutrition*, No. nmab046, available at: <https://doi.org/10.1093/advances/nmab046>.

Rand, W.M., Pellett, P.L. and Young, V.R. (2003), "Meta-analysis of nitrogen balance studies for estimating protein requirements in healthy adults", *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 77 No. 1, pp. 109–127.

Recommendations Concerning Diet, Physical Activity and Sedentary Behavior for Adults. (2019b), Educational file., French Public Health Agency, Paris, France, available at: www.santepubliquefrance.fr (accessed 28 January 2022).

Réflexion Pour Une Expérimentation d'un Étiquetage Du Mode d'élevage, Avis 85. (2020), , Conseil National de l'Alimentation, p. 94.

Reuzé, A., Méjean, C., Carrere, M., Sirieix, L., Pecollo, N., Péneau, S., Touvier, M., *et al.* (2021), "Identifying attitudes and their ability to decrease meat consumption among non-vegetarians from the NutriNet-Santé cohort", *VegMed Web 2021*.

- Reynolds, C.J., Buckley, J.D., Weinstein, P. and Boland, J. (2014), "Are the Dietary Guidelines for Meat, Fat, Fruit and Vegetable Consumption Appropriate for Environmental Sustainability? A Review of the Literature", *Nutrients*, Vol. 6 No. 6, pp. 2251–2265.
- Reynolds, C.J., Horgan, G.W., Whybrow, S. and 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*, Vol. 22 No. 8, pp. 1503–1517.
- Richter, C.K., Skulas-Ray, A.C., Champagne, C.M. and Kris-Etherton, P.M. (2015), "Plant Protein and Animal Proteins: Do They Differentially Affect Cardiovascular Disease Risk?", *Advances in Nutrition*, Vol. 6 No. 6, pp. 712–728.
- Rohmer, S.U.K., Gerdessen, J.C. and Claassen, G.D.H. (2019), "Sustainable supply chain design in the food system with dietary considerations: A multi-objective analysis", *European Journal of Operational Research*, Vol. 273 No. 3, pp. 1149–1164.
- Rohmer, S.U.K., Gerdessen, J.C., Claassen, G.D.H., Bloemhof, J.M. and van 't Veer, P. (2018), "A nutritional comparison and production perspective: Reducing the environmental footprint of the future", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 196, pp. 1407–1417.
- Sá, A.G.A., Moreno, Y.M.F. and Carciofi, B.A.M. (2020), "Food processing for the improvement of plant proteins digestibility", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, Vol. 60 No. 20, pp. 3367–3386.
- Safiri, S., Kolahi, A.-A., Noori, M., Nejadghaderi, S.A., Karamzad, N., Bragazzi, N.L., Sullman, M.J.M., *et al.* (2021), "Burden of anemia and its underlying causes in 204 countries and territories, 1990–2019: results from the Global Burden of Disease Study 2019", *Journal of Hematology & Oncology*, Vol. 14 No. 1, p. 185.
- Salomé, M., de Gavelle, E., Dufour, A., Dubuisson, C., Volatier, J.-L., Fouillet, H., Huneau, J.-F., *et al.* (2020), "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*, Vol. 150 No. 3, pp. 536–545.
- Salomé, M., Fouillet, H., Nicaud, M.-C., Dussiot, A., Kesse-Guyot, E., Maillard, M.-N., Huneau, J.-F., *et al.* (2021), "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", *Current Developments in Nutrition*, Vol. 5 No. Supplement_2, pp. 1089–1089.

- Salomé, M., Huneau, J.-F., Le Baron, C., Kesse-Guyot, E., Fouillet, H. and Mariotti, F. (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)”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 151 No. 8, pp. 2435–2445.
- Salomé, M., Kesse-Guyot, E., Fouillet, H., Touvier, M., Hercberg, S., Huneau, J.-F. and Mariotti, F. (2021), “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*, Vol. 126 No. 8, pp. 1225–1236.
- Satija, A., Bhupathiraju, S.N., Spiegelman, D., Chiuve, S.E., Manson, J.E., Willett, W., Rexrode, K.M., *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*, Vol. 70 No. 4, pp. 411–422.
- Sawicki, C.M., Jacques, P.F., Lichtenstein, A.H., Rogers, G.T., Ma, J., Saltzman, E. and McKeown, N.M. (2021), “Whole- and Refined-Grain Consumption and Longitudinal Changes in Cardiometabolic Risk Factors in the Framingham Offspring Cohort”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 151 No. 9, pp. 2790–2799.
- Scarborough, P., Appleby, P.N., Mizdrak, A., Briggs, A.D.M., Travis, R.C., Bradbury, K.E. and Key, T.J. (2014), “Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK”, *Climatic Change*, Vol. 125 No. 2, pp. 179–192.
- Scarborough, P., Harrington, R.A., Mizdrak, A., Zhou, L.M. and Doherty, A. (2014), “The Preventable Risk Integrated Model and Its Use to Estimate the Health Impact of Public Health Policy Scenarios”, *Scientifica*, Vol. 2014, pp. 1–21.
- Schaafsma, G. (2000), “The Protein Digestibility–Corrected Amino Acid Score”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 130 No. 7, pp. 1865S–1867S.
- Schlemmer, U., Frølich, W., Prieto, R.M. and Grases, F. (2009), “Phytate in foods and significance for humans: Food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis”, *Molecular Nutrition & Food Research*, Vol. 53 No. S2, pp. S330–S375.
- Schösler, H., Boer, J. de and Boersema, J.J. (2012), “Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution”, *Appetite*, Vol. 58 No. 1, pp. 39–47.
- Schwingshackl, L., Knüppel, S., Michels, N., Schwedhelm, C., Hoffmann, G., Iqbal, K., De Henauw, S., *et al.* (2019), “Intake of 12 food groups and disability-adjusted life years from coronary heart disease,

- stroke, type 2 diabetes, and colorectal cancer in 16 European countries”, *European Journal of Epidemiology*, Vol. 34 No. 8, pp. 765–775.
- Schwingshackl, L., Schwedhelm, C., Hoffmann, G., Knüppel, S., Preterre, A.L., Iqbal, K., Bechthold, A., *et al.* (2018), “Food groups and risk of colorectal cancer”, *International Journal of Cancer*, Vol. 142 No. 9, pp. 1748–1758.
- Schwingshackl, L., Schwedhelm, C., Hoffmann, G., Lampousi, A.-M., Knüppel, S., Iqbal, K., Bechthold, A., *et al.* (2017), “Food groups and risk of all-cause mortality: a systematic review and meta-analysis of prospective studies”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 105 No. 6, pp. 1462–1473.
- Scientific Opinion on Dietary Reference Values for Iron. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA)*. (2015), *EFSA Journal*, Vol. 13, available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2903/j.efsa.2015.4254> (accessed 5 October 2021).
- Scientific Opinion on Dietary Reference Values for Zinc*. (2014), , European Food Safety Authority (EFSA), Parma, Italy, p. 76.
- Seconda, L., Baudry, J., Allès, B., Boizot-Szantaï, C., Soler, Ig, Galan, P., Hercberg, S., *et al.* (2018), “Comparing nutritional, economic, and environmental performances of diets according to their levels of greenhouse gas emissions”, *Climatic Change*, Vol. 148.
- Seves, S.M., Verkaik-Kloosterman, J., Biesbroek, S. and Temme, E.H. (2017), “Are more environmentally sustainable diets with less meat and dairy nutritionally adequate?”, *Public Health Nutrition*, Vol. 20 No. 11, pp. 2050–2062.
- Sijtsema, S.J., Dagevos, H., Nassar, G., van Haaster de Winter, M. and Snoek, H.M. (2021), “Capabilities and Opportunities of Flexitarians to Become Food Innovators for a Healthy Planet: Two Explorative Studies”, *Sustainability*, Vol. 13 No. 20, p. 11135.
- Sobiecki, J.G., Appleby, P.N., Bradbury, K.E. and 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*, Vol. 36 No. 5, pp. 464–477.
- Springmann, M. (Ed.). (2020), *Valuation of the Health and Climate-Change Benefits of Healthy Diets*, available at: <https://www.fao.org/3/cb1699en/cb1699en.pdf> (accessed 20 May 2022).

- Springmann, M., Clark, M., Mason-D’Croz, D., Wiebe, K., Bodirsky, B.L., Lassaletta, L., de Vries, W., *et al.* (2018), “Options for keeping the food system within environmental limits”, *Nature*, Vol. 562 No. 7728, pp. 519–525.
- Springmann, M., Mason-D’Croz, D., Robinson, S., Wiebe, K., Godfray, H.C.J., Rayner, M. and Scarborough, P. (2018), “Health-motivated taxes on red and processed meat: A modelling study on optimal tax levels and associated health impacts”, *PLOS ONE*, Vol. 13 No. 11, p. e0204139.
- Springmann, M., Wiebe, K., Mason-D’Croz, D., Sulser, T.B., Rayner, M. and Scarborough, P. (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*, Vol. 2 No. 10, pp. e451–e461.
- Steele, M., Mialon, M., Browne, S., Campbell, N. and Finucane, F. (2021), “Obesity, public health ethics and the nanny state”, *Ethics, Medicine and Public Health*, Vol. 19, p. 100724.
- Stewart, C., Piernas, C., Cook, B. and Jebb, S.A. (2021), “Trends in UK meat consumption: analysis of data from years 1–11 (2008–09 to 2018–19) of the National Diet and Nutrition Survey rolling programme”, *The Lancet Planetary Health*, Elsevier, Vol. 5 No. 10, pp. e699–e708.
- Study of the Relationship between Food Group Consumption and Risk of Chronic Non-Communicable Diseases*, Collective expertise report. (2016a), , French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Paris, France, p. 186.
- Stylianou, K.S., Fulgoni, V.L. and Jolliet, O. (2021), “Small targeted dietary changes can yield substantial gains for human health and the environment”, *Nature Food*, Vol. 2 No. 8, pp. 616–627.
- Sun, H. and Weaver, C.M. (2021), “Decreased Iron Intake Parallels Rising Iron Deficiency Anemia and Related Mortality Rates in the US Population”, *The Journal of Nutrition*, Vol. 151 No. 7, pp. 1947–1955.
- Sustainable Diets and Biodiversity, Directions and Solutions for Policy, Research and Action*, collective expertise report. (2010), , Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, Italy, p. 308.
- Sustainable Healthy Diets: Guiding Principles*. (2019), , World Health Organization (WHO), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), p. 37.
- Talon, R., Leroy, S., Vermassen, A. and Christieans, S. (2015), *Réduction Des Nitrates, Nitrites Dans Les Produits Carnés: Quelles Conséquences? Quelles Solutions?*, Innovations Agronomiques No. 44, INRAE, pp. 25–34.

- Tanumihardjo, S.A. (2002), “Factors Influencing the Conversion of Carotenoids to Retinol: Bioavailability to Bioconversion to Bioefficacy”, *International Journal for Vitamin and Nutrition Research*, Vol. 72 No. 1, pp. 40–45.
- The 2019 European Union Report on Pesticide Residues in Food*. (2019), , European Food Safety Authority, available at: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2903/j.efsa.2021.6491> (accessed 5 February 2022).
- The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges*. (2017), , Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, Italy, p. 163.
- The nutritional guideline update for vitamins and minerals*, Collective expertise report. (2021), , French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Paris, France, p. 241.
- The Third Individual and National Survey on Food Consumption (INCA3 Survey)*. (2017), French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses), Maisons-Alfort, France, available at: <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf> [cited 2021 Jun 22] (accessed 22 June 2021).
- Thorpe, D.L., Beeson, W.L., Knutsen, R., Fraser, G.E. and Knutsen, S.F. (2021), “Dietary patterns and hip fracture in the Adventist Health Study 2: combined vitamin D and calcium supplementation mitigate increased hip fracture risk among vegans”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 114 No. 2, pp. 488–495.
- Toribio-Mateas, M.A., Bester, A. and Klimenko, N. (2021), “Impact of Plant-Based Meat Alternatives on the Gut Microbiota of Consumers: A Real-World Study”, *Foods*, Vol. 10 No. 9, p. 2040.
- Trichopoulou, A., Martínez-González, M.A., Tong, T.Y., Forouhi, N.G., Khandelwal, S., Prabhakaran, D., Mozaffarian, D., *et al.* (2014), “Definitions and potential health benefits of the Mediterranean diet: views from experts around the world”, *BMC Medicine*, Vol. 12 No. 1, p. 112.
- Tso, R. and Forde, C.G. (2021), “Unintended Consequences: Nutritional Impact and Potential Pitfalls of Switching from Animal- to Plant-Based Foods”, *Nutrients*, Vol. 13 No. 8, p. 2527.
- Tuomisto, H.L. (2018), “Importance of considering environmental sustainability in dietary guidelines”, *The Lancet Planetary Health*, Elsevier, Vol. 2 No. 8, pp. e331–e332.

- Tyszler, M., Kramer, G. and Blonk, H. (2016), "Just eating healthier is not enough: studying the environmental impact of different diet scenarios for Dutch women (31–50 years old) by linear programming", *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 21 No. 5, pp. 701–709.
- Ubago-Guisado, E., Rodríguez-Barranco, M., Ching-López, A., Petrova, D., Molina-Montes, E., Amiano, P., Barricarte-Gurrea, A., *et al.* (2021), "Evidence Update on the Relationship between Diet and the Most Common Cancers from the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC) Study: A Systematic Review", *Nutrients*, Vol. 13 No. 10, p. 3582.
- Updating of the PNNS Guidelines: Revision of the Food-Based Dietary Guidelines.* (2016b), French Agency for Food, Environmental and Occupational Health Safety (Anses)., Maisons-Alfort, France, available at: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf> [cited 2021 Jun 22] (accessed 22 June 2021).
- van Dooren. (2018a), "A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally", *Frontiers in Nutrition*, Vol. 5, p. 48.
- van Dooren. (2018b), *Simultaneous Optimisation of the Nutritional Quality and Environmental Sustainability of Diets*, PhD-Thesis - Research and graduation internal, available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35539.07202>.
- Vanham, D., Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2013), "The water footprint of the EU for different diets", *Ecological Indicators*, Vol. 32, pp. 1–8.
- Végétariens et Flexitariens En France En 2020. Enquête FranceAgrimer / IFOP*, Enquete. (2021), , FranceAgrimer / IFOP, p. 151 p.
- Verger, E.O., Holmes, B.A., Huneau, J.F. and Mariotti, F. (2014), "Simple changes within dietary subgroups can rapidly improve the nutrient adequacy of the diet of French adults", *The Journal of Nutrition*, Vol. 144 No. 6, pp. 929–936.
- Verger, E.O., Mariotti, F., Holmes, B.A., Paineau, D. and 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*, Vol. 7 No. 8, p. e42155.
- Vieux, F., Darmon, N., Touazi, D. and Soler, L.G. (2012), "Greenhouse gas emissions of self-selected individual diets in France: Changing the diet structure or consuming less?", *Ecological Economics*, Vol. 75, pp. 91–101.

- Viguiliouk, E., Glenn, A.J., Nishi, S.K., Chiavaroli, L., Seider, M., Khan, T., Bonaccio, M., *et al.* (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*, Vol. 10 No. Supplement_4, pp. S308–S319.
- Vitamin and Mineral Requirements in Human Nutrition*. (2005), 2nd ed., World Health Organization ; Food and Agriculture Organization of the United Nations, Geneva : Rome, available at: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42716> (accessed 28 January 2022).
- Walker, C., Pfister, S. and Hellweg, S. (2021), “Methodology and optimization tool for a personalized low environmental impact and healthful diet specific to country and season”, *Journal of Industrial Ecology*, Vol. 25 No. 5, pp. 1147–1160.
- Walters, G.O., Miller, F.M. and Worwood, M. (1973), “Serum ferritin concentration and iron stores in normal subjects”, *Journal of Clinical Pathology*, Vol. 26 No. 10, pp. 770–772.
- Wang, T., Grech, A., Dissanayake, H.U., Boylan, S. and Skilton, M.R. (2021), “Modeling the Effect of Environmentally Sustainable Food Swaps on Nutrient Intake in Pregnant Women”, *Nutrients*, Vol. 13 No. 10, p. 3355.
- Wang, X., Lin, X., Ouyang, Y.Y., Liu, J., Zhao, G., Pan, A. and Hu, F.B. (2016), “Red and processed meat consumption and mortality: dose–response meta-analysis of prospective cohort studies”, *Public Health Nutrition*, Vol. 19 No. 5, pp. 893–905.
- Wang, Y., Hill, E.R., Campbell, W.W. and O’Connor, L.E. (2022), “Plant- and Animal-Based Protein-Rich Foods and Cardiovascular Health”, *Current Atherosclerosis Reports*, Vol. 24 No. 4, pp. 197–213.
- Weindl, I., Ost, M., Wiedmer, P., Schreiner, M., Neugart, S., Klopsch, R., Kühnhold, H., *et al.* (2020), “Sustainable food protein supply reconciling human and ecosystem health: A Leibniz Position”, *Global Food Security*, Vol. 25, p. 100367.
- Wessels, I., Fischer, H.J. and Rink, L. (2021), “Dietary and Physiological Effects of Zinc on the Immune System”, *Annual Review of Nutrition*, Vol. 41, pp. 133–175.
- What National and Subnational Interventions and Policies Based on Mediterranean and Nordic Diets Are Recommended or Implemented in the WHO European Region, and Is There Evidence of Effectiveness in Reducing Noncommunicable Diseases ?*, Health Evidence Network (HEN) synthesis report 58. (2018), , World Health Organization, Copenhagen, Denmark, available at:

- <https://www.euro.who.int/en/publications/abstracts/what-national-and-subnational-interventions-and-policies-based-on-mediterranean-and-nordic-diets-are-recommended-or-implemented-in-the-who-european-region,-and-is-there-evidence-of-effectiveness-in-reducing-noncommunicable-diseases-2018> (accessed 20 May 2022).
- WHO. (2020), “Healthy diet”, World Health Organization, , 29 April, available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet> (accessed 4 April 2022).
- Wickramasinghe, K., Breda, J., Berdzuli, N., Rippin, H., Farrand, C. and Halloran, A. (2021), “The shift to plant-based diets: are we missing the point?”, *Global Food Security*, Vol. 29, p. 100530.
- Willett, W., Rockström, J., Loken, B., Springmann, M., Lang, T., Vermeulen, S., Garnett, T., *et al.* (2019), “Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems”, *The Lancet*, Vol. 393 No. 10170, pp. 447–492.
- Wilson, N., Cleghorn, C.L., Cobiac, L.J., Mizdrak, A. and Nghiem, N. (2019), “Achieving Healthy and Sustainable Diets: A Review of the Results of Recent Mathematical Optimization Studies”, *Advances in Nutrition*, Vol. 10 No. Suppl_4, pp. S389–S403.
- Winnie Gerbens-Leenes, P. (2017), *Dietary Transition: Longterm Trends, Animal Versus Plant Energy Intake, and Sustainability Issues. Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*, Academic Press., F. Mariotti.
- Woods, A. and Bresalier, M. (2014), “One health, many histories”, *Veterinary Record*, Vol. 174 No. 26, pp. 650–654.
- Wuehler, S.E., Peerson, J.M. and Brown, K.H. (2005), “Use of national food balance data to estimate the adequacy of zinc in national food supplies: methodology and regional estimates”, *Public Health Nutrition*, Vol. 8 No. 7, pp. 812–819.
- Wyness, L., Weichselbaum, E., O’Connor, A., Williams, E.B., Benelam, B., Riley, H. and Stanner, S. (2011), “Red meat in the diet: an update”, *Nutrition Bulletin*, Vol. 36 No. 1, pp. 34–77.
- Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T.-S., Ciaias, P., Tubiello, F.N., Smith, P., *et al.* (2021), “Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods”, *Nature Food*, Vol. 2 No. 9, pp. 724–732.
- Young, V.R. and Pellett, P.L. (1994), “Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition”, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Vol. 59 No. 5 Suppl, pp. 1203S-1212S.

Zagmutt, F.J., Pouzou, J.G. and Costard, S. (2020), "The EAT-Lancet Commission's Dietary Composition May Not Prevent Noncommunicable Disease Mortality", *The Journal of Nutrition*, Vol. 150 No. 5, pp. 985–988.

Zinsstag, J., Schelling, E., Waltner-Toews, D., Whittaker, M. and Tanner, M. (Eds.). (2015), *One Health: The Theory and Practice of Integrated Health Approaches*, CABI, Wallingford, available at:<https://doi.org/10.1079/9781780643410.0000>.

