



Qualité environnementale des aliments : comment l'évaluer pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception des produits ?

Adeline Cortesi

► To cite this version:

Adeline Cortesi. Qualité environnementale des aliments : comment l'évaluer pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception des produits ?. Ingénierie des aliments. Université Paris-Saclay, 2022. Français. NNT : 2022UPASB061 . tel-03948280

HAL Id: tel-03948280

<https://pastel.hal.science/tel-03948280>

Submitted on 20 Jan 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.

Qualité environnementale des aliments : comment l'évaluer pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception des produits ?

*Environmental quality of food: How to assess it in order to integrate it
with other quality dimensions in product design?*

Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay

École doctorale n° 581,
Agriculture, Alimentation, Biologie, Environnement et Santé (ABIES)
Spécialité de doctorat : Science des aliments et des bioproduits
Graduate School : Biosphera. Référent : AgroParisTech

Thèse préparée dans l'UMR **SayFood** (Université Paris-Saclay, INRAE, AgroParisTech),
sous la direction de **Gwenola YANNOU-LE BRIS**, Maîtresse de Conférences (HDR),
le co-encadrement de **Caroline PENICAUD**, Chargée de Recherche

Thèse soutenue à Paris-Saclay, le 29 Novembre 2022, par

Adeline CORTESI

Composition du Jury

Membres du jury avec voix délibérative

Catherine RENARD

Directrice de Recherche, INRAE (centre Pays de la Loire)

Présidente

Mauricio CAMARGO

Professeur, Université de Lorraine

Rapporteur & Examineur

Arnaud HELIAS

Directeur de Recherche, INRAE (centre Occitanie-Montpellier)

Rapporteur & Examineur

Christian BOCKSTALLER

Ingénieur de Recherche, INRAE (centre Grand-Est-Colmar)

Examineur

Frédérique JOURJON

Invitée

Titre : Qualité environnementale des aliments : Comment l'évaluer pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception des produits ?

Mots clés : Aliments, performance environnementale, évaluation multicritère, écoconception

Résumé : L'alimentation humaine est responsable d'importants impacts environnementaux. L'étude de ces impacts est donc primordiale afin de mieux en comprendre les origines avant d'identifier les solutions permettant de les réduire dès la conception des produits alimentaires. Cependant, d'autres dimensions de la qualité sont majeures dans la conception d'aliments, comme la qualité sensorielle et la qualité nutritionnelle. Dans ce contexte, l'objectif principal de la thèse était d'explorer des moyens permettant d'intégrer la dimension environnementale dans la conception de produits alimentaires au même titre que d'autres dimensions de la qualité. L'étude des impacts environnementaux par Analyse de Cycle de Vie (ACV) de différents produits alimentaires d'une même catégorie (80 pizzas industrielles et 44 fromages artisanaux) a mis en évidence une importante variabilité de ces impacts dans chacune des deux catégories de produits ainsi que des corrélations positives à certaines teneurs nutritionnelles au sein d'une même catégorie d'aliments. Des variations d'impacts environnementaux ont également été mises en évidence entre les mêmes produits alimentaires (pizzas) fabriqués industriellement et à domicile, en lien avec la variabilité des pratiques des consommateurs. Tous ces résultats, basés sur des unités fonctionnelles (UF) massiques, présentent une limite

importante puisque l'UF est censée être représentative de la fonction du produit étudié. L'utilisation de différentes UF nutritionnelles pour classer les aliments d'une même catégorie selon leurs impacts environnementaux a montré que le classement des produits ayant un plus grand intérêt nutritionnel était amélioré par rapport à celui obtenu avec une UF massique. Cependant, bien que l'utilisation d'une UF nutritionnelle soit un moyen de prendre en compte la fonction nutritionnelle des aliments lors de leur évaluation par ACV, son intérêt reste limité. En effet, son usage rend compte d'une seule dimension quand d'autres dimensions de la qualité ne sont pas prises en compte. Des entretiens menés auprès de professionnels du secteur de l'agroalimentaire ont cependant confirmé que les qualités nutritionnelle et sensorielle des aliments étaient majeures pour eux. Ainsi, un modèle d'évaluation multicritère, prenant en compte à la fois les qualités nutritionnelle, sensorielle et environnementale des aliments, a été développé sur le logiciel DEXi et permet de discriminer des aliments d'une même catégorie (pizzas). Cette approche constitue ainsi une aide à la conception d'aliments meilleurs pour l'environnement tout en maintenant une bonne qualité nutritionnelle et le plaisir sensoriel du consommateur.

Title: Environmental quality of food: How to assess it in order to integrate it with other quality dimensions in product design?

Keywords: Foods, environmental performance, multi-criteria assessment, eco-design

Abstract: Human food is responsible for significant environmental impacts. The study of these impacts is therefore essential to better understand their origin and to find ways to reduce them in the design of food products. However, other dimensions of quality are major in food design, such as sensory quality and nutritional quality. In this context, the main objective of the thesis was to explore ways to integrate the environmental dimension in the design of food products in the same way as other quality dimensions. The study of environmental impacts by Life Cycle Assessment (LCA) of different food products of the same category (80 industrial pizzas and 44 artisanal cheeses) revealed a significant variability of these impacts in each of the two categories of products as well as positive correlations to certain nutritional contents within the same food category. Variations in environmental impacts were also found between the same food products (pizzas) produced industrially and at home, related to the variability of consumer practices. All these results, based on mass functional units (FU), present an important limitation since the FU is supposed to be representative of the function of the product studied.

The use of different nutritional FUs to rank food products in the same category according to their environmental impacts showed that the ranking of products with a better nutritional value was improved compared to a mass FU. However, although the use of a nutritional FU is a way to take into account the nutritional function of food products during their LCA, its interest is limited. Indeed, its use takes into account only one dimension at a time when qualitative aspects such as sensory quality are not taken into account. However, interviews with professionals in the food industry confirmed that the nutritional and sensory qualities of food were major for them. Thus, a multi-criteria evaluation model based on the DEXi software, which takes into account the nutritional, sensory and environmental qualities of foods, has been developed and makes it possible to discriminate between foods in the same category (pizzas). This approach thus supports the design of foods that are better for the environment while maintaining a good nutritional quality and the sensory pleasure of the consumer.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier très chaleureusement les deux personnes qui ont rendu cette thèse possible, à savoir ma directrice Gwenola Yannou-Le Bris et ma co-encadrante Caroline Pénicaud. J'ai eu beaucoup de chance d'être aussi bien supervisée pendant cette thèse, aussi bien sur le plan professionnel qu'humain. Vous vous êtes toujours rendues disponibles quand j'en avais besoin pour me conseiller au mieux et toujours avec bienveillance. J'ai apprécié tous nos moments d'échange qui m'ont beaucoup appris et m'ont fait évoluer. Je vous suis très reconnaissante pour ces trois années dont je garderai un très bon souvenir. Je suis d'ailleurs très contente de pouvoir continuer d'évoluer à vos côtés pour une année de post-doc !

Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du jury d'avoir accepté de prendre part à l'évaluation de mes travaux ainsi que pour les échanges intéressants qui en ont découlé.

Un grand merci également aux membres de mon comité de thèse : Frédérique Angevin, Nicole Darmon, Stéphane Georgé et Pierre Larraufie. Merci pour vos précieux retours, votre bienveillance et votre aide à différentes étapes de ma thèse.

Je remercie également l'ensemble des personnes avec lesquelles j'ai eu la chance de travailler et d'échanger, notamment les membres des projets Transfo-Quape, DYNAMO et DataSusFood ainsi que Bruno Perret, Camille Quentier, David Forest, Gilles Garric, Louis Georges Soler et Marie-Noëlle Leclercq-Perlat.

Un grand merci également aux deux stagiaires UTC qui ont contribué aux travaux présentés dans ce manuscrit : Laure Dijoux et Marine Colpaert. J'ai beaucoup apprécié travailler avec vous, ces expériences font partie des moments de ma thèse que j'ai préférés ! Merci également aux deux étudiantes AgroParisTech, Juliette Dessertine et Valentine de Raigniac, qui ont participé à mes travaux de thèse dans le cadre de projets étudiants.

Je remercie aussi les membres de l'école doctorale ABIES pour leur disponibilité ainsi que pour les formations proposées.

Merci également aux réseaux EcoSD et IDEAS qui m'ont notamment permis de présenter mes travaux et de faire évoluer ma réflexion sur mes thématiques de recherche.

Enfin, un très grand merci à l'ensemble de l'UMR SayFood et en particulier à l'équipe IHAC pour leur accueil. J'ai fait de très belles rencontres aussi bien professionnelles qu'amicales.

Je remercie notamment toutes les personnes avec lesquelles j'ai pu passer de bons moments au cours de ces trois années (collègues de bureau, camarades de cantine, doctorants, ...). Un merci tout particulier à Alice, Amandine, Amélie, Ana Karen, Audrey, Bastien, Camille, Charlotte, Cynthia, David, Florence, Hawraa, Hélène, Juan, Julia, Léa, Lucas, Maëlle, Maria, Michèle, Miodrag, Nathalie, Nathasha, Pauline, Phuong, Rémi, Rohit, Samuel, Thomas, Valentine, Valérie, Yurixy.

Je souhaite également remercier mes proches pour leur soutien durant ces trois années de thèse (et bien plus !).

Merci tout d'abord à tous les membres de ma famille et belle-famille qui ont suivi de près ou de loin mon aventure de thèse et m'ont soutenue. Un merci tout particulier à mes parents, ma grand-mère et ma sœur pour leur écoute, leur aide, leur compréhension et leur amour. Un immense merci également à toi Pedro. Tu as été mon plus grand soutien pendant cette thèse et je t'en suis très reconnaissante.

Un grand merci également à mes amis les plus proches, à savoir :

Mes amies de longue date, en particulier Laurence, Mathilde, Léa et Claire. Merci de m'avoir encouragée depuis toujours et de m'avoir soutenue. Merci d'avoir été présentes.

Mes amis de prépa BCPST, en particulier Inès, Anne-Sophie, Armand et Nicolas. Votre amitié m'est précieuse et je

suis reconnaissante qu'on parvienne à la maintenir malgré la distance qui nous sépare et les années qui passent.

Mes amies d'école d'ingénieur, en particulier Pauline, Elodie, Jessica et Justine. Merci pour les bons moments passés ensemble ! C'est toujours un plaisir de vous voir et j'espère qu'on pourra le faire davantage maintenant que j'ai fini ma thèse.

Enfin, je termine ces remerciements par une personne qui m'est très chère, mon grand-père René. Tu n'as malheureusement pas pu être présent physiquement durant ces trois années mais tu étais dans mon cœur et je sais que tu aurais été fier de moi. Je regrette de ne pas avoir pu partager cette expérience avec toi, je sais que ça t'aurait intéressé et qu'on aurait pu bien discuter comme à notre habitude. Je me souviens quand, petite, tu m'apprenais à lire et plus récemment quand tu me conseillais d'essayer la recherche. Tu as toujours été de très bons conseils et un exemple pour moi. Merci de m'avoir toujours soutenue, écoutée, questionnée et d'avoir cru en moi toutes ces années. Sache que c'est en partie grâce à toi que j'en suis là et c'est pourquoi je te dédie cette thèse.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE.....	5
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS ORALES	9
TABLE DES ABREVIATIONS.....	11
TABLE DES FIGURES.....	12
TABLE DES TABLEAUX	13
INTRODUCTION.....	14
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART.....	19
1.1. DIMENSIONS DE LA QUALITE DES PRODUITS ALIMENTAIRES	19
1.2. QUALITE SANITAIRE.....	20
1.2.1. Evolution des enjeux au cours du temps.....	20
1.2.2. Stratégies des entreprises agroalimentaires pour faire face à ces enjeux.....	20
1.2.3. Evaluation de la qualité sanitaire	21
1.2.4. Conclusions sur la qualité sanitaire	23
1.3. QUALITE SENSORIELLE.....	23
1.3.1. Evolution des enjeux au cours du temps.....	23
1.3.2. Stratégies des entreprises agroalimentaires pour faire face à ces enjeux.....	24
1.3.3. Evaluation de la qualité sensorielle	24
1.3.4. Conclusions sur la qualité sensorielle	26
1.4. QUALITE NUTRITIONNELLE	27
1.4.1. Evolution des enjeux au cours du temps.....	27
1.4.2. Stratégies des entreprises agroalimentaires pour faire face à ces enjeux.....	27
1.4.3. Evaluation de la qualité nutritionnelle.....	29
1.4.4. Conclusions sur la qualité nutritionnelle.....	32
1.5. QUALITE ENVIRONNEMENTALE.....	32
1.5.1. Evolution des enjeux au cours du temps.....	32
1.5.2. Stratégies des entreprises agroalimentaires pour faire face à ces enjeux.....	33
1.5.3. Evaluation de la qualité environnementale.....	37

1.5.4.	Conclusions sur la qualité environnementale	47
1.6.	COUPLAGE ENTRE LA QUALITE ENVIRONNEMENTALE ET D'AUTRES DIMENSIONS DE QUALITE DES ALIMENTS	47
1.6.1.	Etude des relations entre la qualité environnementale et la qualité nutritionnelle ou sensorielle	48
1.6.2.	Réalisation d'ACV basées sur une UF nutritionnelle, plus représentative de la qualité du produit que sa masse	50
1.6.3.	Utilisation d'un score synthétique.....	55
1.6.4.	Utilisation d'outils d'aide à la décision multicritère : Une option intéressante.....	55
 CHAPITRE 2 : VARIABILITE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ENTRE DES PRODUITS ALIMENTAIRES D'UNE MEME CATEGORIE ET LIEN AVEC LEUR COMPOSITION NUTRITIONNELLE		
2.1. Comparaison des impacts environnementaux de 80 pizzas industrielles et étude du lien entre leur performance environnementale et leur composition nutritionnelle (Article 1)		
2.1.1.	Résumé.....	61
2.1.2.	Article 1 : Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market	62
2.1.3.	Implications pour la thèse	90
 2.2. Comparaison des impacts environnementaux de 44 fromages AOP artisanaux et étude du lien entre leur performance environnementale et leur composition nutritionnelle (Article 2)		
2.2.1	Résumé.....	90
2.2.2	Article 2 : Explaining the Differences between the Environmental Impacts of 44 French Artisanal Cheeses.....	91
2.2.3	Implications pour la thèse	119
2.3.	Conclusion du chapitre 2	119
 CHAPITRE 3 : INFLUENCE DE LA VARIABILITE DES PRATIQUES DES CONSOMMATEURS A DOMICILE SUR L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN PRODUIT ALIMENTAIRE ET SUR LES PERCEPTIONS DES CONSOMMATEURS VIS-A-VIS DE CE PRODUIT (ARTICLE 3).....		
3.1	Résumé.....	121
3.2	Article 3 : How do consumer practices contribute to the environmental impacts of a food product? A case study on pizzas.....	122
3.3	Conclusion du chapitre 3	150
 CHAPITRE 4 : PRISE EN COMPTE DE LA DIMENSION NUTRITIONNELLE DANS L'ACV DES PRODUITS ALIMENTAIRES D'UNE MEME CATEGORIE (ARTICLE 4).....		
4.1	Résumé.....	151
4.2.	Article 4 : Nutritional LCA can help to better compare the environmental performance of food products belonging to the same category.....	152

4.3. Conclusion du chapitre 4	181
 CHAPITRE 5 : PRISE EN COMPTE ACTUELLE DE LA QUALITE ENVIRONNEMENTALE AU SEIN DES ENTREPRISES AGROALIMENTAIRES	
5.1. Introduction	182
5.2. Matériel et méthode.....	183
5.2.1. Choix des modèles d'étude.....	183
5.2.2. Participants	184
5.2.3. Déroulement des entretiens.....	186
5.2.4. Grille d'entretien	186
5.2.5. Traitement des résultats	186
5.3. Résultats.....	187
5.3.1. Principaux critères de qualité.....	187
5.3.2. La place de l'environnement.....	195
5.3.2.2. <i>Indicateurs à l'échelle du site de production.....</i>	<i>200</i>
5.3.2.3. <i>Le cas des entreprises à positionnement « durable »</i>	<i>202</i>
5.3.2.4. <i>Freins à la prise en compte de la qualité environnementale des produits</i>	<i>203</i>
5.4. Conclusion du chapitre 5	204
 CHAPITRE 6 : DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL MULTICRITERE D'AIDE A LA CONCEPTION DE PRODUITS ALIMENTAIRES PRENANT EN COMPTE DIFFERENTES DIMENSIONS DE LA QUALITE : ENVIRONNEMENTALE, NUTRITIONNELLE ET SENSORIELLE (ARTICLE 5).....	
6.1 Résumé.....	207
6.2 Article 5 : Multicriteria Criteria Decision Aid model to support food product design integrating environmental, nutritional and sensory dimensions	208
6.3 Conclusion du chapitre 6	231
 CHAPITRE 7 : DISCUSSION GENERALE.....	
7.1. Comment évaluer la dimension environnementale des produits alimentaires dans une optique de conception/reconception de produits ?	231
7.1.1. Manque de données d'ICV.....	232
7.1.2. Limites méthodologiques de l'ACV pour l'étude des impacts environnementaux des produits alimentaires	233
7.1.3. Difficulté des entreprises agroalimentaires à utiliser des indicateurs ACV	234
7.2. Quelles sont les principales dimensions de qualité des produits alimentaires et comment se situe la qualité environnementale par rapport à ces dimensions ?	235

7.3. Comment coupler la qualité environnementale et les autres dimensions dans la conception des produits alimentaires	236
7.4. Limites à travailler à l'échelle du produit alimentaire	239
7.4.1. Echelle produit vs échelle site de production	239
7.4.2. Echelle produit vs échelle régime alimentaire	239
CONCLUSION	240
REFERENCES	243
ANNEXE 1 : DATA PAPER ASSOCIE A L'ARTICLE 1.....	254
ANNEXE 2 : DATA PAPER ASSOCIÉ À L'ARTICLE 2.....	264
ANNEXE 3 : DATA PAPER ASSOCIE A L'ARTICLE 3.....	275
ANNEXE 4 : ANNEXE ASSOCIEE A L'ARTICLE 1	287
ANNEXE 5 : SEMI-STRUCTURED INTERVIEW GUIDE (ARTICLE 5)	289
ANNEXE 6 : INDICATORS MENTIONED DURING SEMI-STRUCTURED INTERVIEWS (ARTICLE 5).....	290
ANNEXE 7 : DECISION RULES (ARTICLE 5)	291

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS ORALES

Articles scientifiques

Article publié dans *Journal of cleaner production* (Article 1)

Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022. Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market. *Journal of Cleaner Production* 336, 130128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130128>

Article publié dans *Sustainability* (Article 2)

Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C., 2022. Explaining the Differences between the Environmental Impacts of 44 French Artisanal Cheeses. *Sustainability* 14, 9484. <https://doi.org/10.3390/su14159484>

Article soumis à *Journal of sustainable production and consumption* (Article 3)

Cortesi, A., Colpaert, M., Saint-Eve, A., Maurice, B., Yannou-Le Bris, G., Souchon, I., Pénicaud, C. How do consumer practices contribute to the environmental impacts of a food product? A case study on pizza (Submitted to *Journal of sustainable production and consumption*).

Article pour soumission à *The international journal of life cycle assessment* (Article 4)

Cortesi, A., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C.,. Nutritional LCA can help to better compare the environmental performance of food products belonging to the same category.

Article pour soumission à *Foods* (Article 5)

Cortesi, A., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C.,. Multicriteria Criteria Decision Analysis model to support food product design integrating environmental, nutritional and sensory dimensions.

Data papers

Data paper publié dans *Data in brief* (ANNEXE 1)

Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022. Life cycle inventory and assessment data for quantifying the environmental impacts of a wide range of food products belonging to the same food category: A case study of 80 pizzas representatives of the French retail market. *Data in Brief* 41, 107950. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107950>

Data paper publié dans *Data in brief* (ANNEXE 2)

Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C., 2022. Data related to the Life Cycle Assessment of 44 artisanally produced French Protected Designation of Origin (PDO) cheeses. *Data Brief*, 43, 108403. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108403>.

Data paper soumis à Data in brief (co-soumission avec l'article associé) (ANNEXE 3)

Cortesi, A, Colpaert, M., Saint-Eve, A., Maurice, B., Yannou-Le Bris, G., Souchon, I., Pénicaud, C.,. Data related to the Life Cycle Assessment of pizzas produced in different contexts and including the variability of consumers' practices (Submitted to data in brief)

Communications orales internationales

Présentation orale au workshop doctoral européen EEFoST

Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C., 2022. Understanding the origin of the variability of environmental impact between cheeses in order to develop a simplified Life Cycle Assessment (LCA) model for estimating the environmental performance of cheeses. EEFoST European PhD workshop. Zurich, Suisse.

Présentation orale acceptée au congrès international LCA Foods 2022

Cortesi, A, Colpaert, M., Saint-Eve, A., Maurice, B., Yannou-Le Bris, G., Souchon, I., Pénicaud, C.,.2022. Influence of the food preparation mode on the environmental performance of food products: A case study on pizzas. LCA Foods. Lima, Peru (online).

Posters scientifiques

Poster présenté au congrès international LCA Foods 2020

Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2020. Nutritional LCA improves the understanding of the environmental impacts of foods taking into account the diversity of recipes within a same food category: the case of pizzas. LCA Foods. Berlin, Germany (online).

Poster accepté au congrès international LCA Foods 2022

Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C., 2022. Comparing the environmental impacts of 44 French cheeses using two scenarios of ripening rooms. LCA Foods. Lima, Peru (online).

Poster accepté au congrès international EEFoST 2022

Cortesi, A., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C., 2022. Multicriteria assessment tool to support design of food products integrating environmental, nutritional and sensory dimensions. EEFoST Dublin, Irelande.

TABLE DES ABREVIATIONS

ACV : Analyse de cycle de vie

AS : Apport Satisfaisant

BNM : Besoin Nutritionnel Moyen

EF : Environmental Footprint

FU : Functional unit

ICV : Inventaire de cycle de vie

ISO : International Organisation for Standardisation

LCA : Life Cycle Assessment

LSS: Limite Supérieure de Sécurité

MADM : Multi-attribute decision-making

MCDA : Multi-criteria decision aid

MODM : Multi-objective decision making

PEF : Product Environmental Footprint

PNA : Plan National pour l'Alimentation

PNAN : Plan National de l'Alimentation et de la Nutrition

PNNS : Programme National Nutrition Santé

RNP : Référence Nutritionnelle pour la Population

UF : Unité fonctionnelle

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma général des axes de recherche de la thèse et modèles d'études associés

Figure 1.1. Evolution des challenges de la transformation alimentaire au cours du temps (figure adaptée de Augusto, 2020)

Figure 1.2. Roue des arômes des fromages à pâtes dures et mi dures (Agroscope, 2012)

Figure 1.3. Principales étapes de l'ACV (figure issue de la norme ISO 14040 (ISO, 2006b)

Figure 1.4. Exemple simplifié du cycle de vie d'un produit pris en compte en acv

Figure 1.5. Arbre hiérarchique du modèle MASC 2.0 (figure adaptée de Craheix et al., 2012)

Figure 2.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 2

Figure 3.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 3

Figure 4.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 4

Figure 5.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 5

Figure 5.2. Modèles d'étude choisis pour interroger les professionnels de l'agroalimentaire sur la place de la qualité environnementale des produits alimentaires par rapport aux autres dimensions de qualité

Figure 5.3. Nuage de mots représentant les indicateurs de la qualité fonctionnelle des sauces tomate

Figure 5.4. Critères environnementaux mentionnés par les professionnels interrogés (tous modèles confondus) ; MP : matières premières

Figure 6.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 6

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Principales étapes d'un processus de conception et de développement de produit et actions visant à atteindre une certaine performance environnementale de ce produit (ISO, 2003)

Tableau 1.2. Exemples d'actions environnementales conduites par des entreprises agroalimentaires (ANIA, 2015)

Tableau 1.3. Présentation des 16 indicateurs EF (Environmental Footprint) (Informations recueillies dans Sala et al., 2019)

Tableau 1.4. Facteurs de pondérations utilisés pour le calcul du Single Score EF3 (adapté de Sala et al., 2018)

Tableau 1.5. Comparaison de différentes MCDA pour l'évaluation de la durabilité de systèmes agricoles (adapté de Sadok et al., 2008)

Tableau 5.1. Type d'entreprise et de service dans lesquels exercent les personnes interrogées

Tableau 5.2. Indicateurs sensoriels mentionnés spontanément par les professionnels du secteur des fromages et nombre de mentions

Tableau 5.3. Présentation des indicateurs de qualité sensoriels mentionnés spontanément par les professionnels du secteur « pizzas »

INTRODUCTION

Les enjeux environnementaux sont une préoccupation majeure du 21^{ème} siècle. Les ressources planétaires s'épuisent progressivement et la pollution des milieux terrestres, aquatiques et aériens ne cesse d'augmenter. Ainsi, le GIEC met en garde sur l'intensification alarmante du changement climatique (GIEC, 2019). Ceci est d'autant plus préoccupant que la population devrait atteindre plus de 9,8 milliards d'habitants d'ici 2050 (ONU, 2017). Au sein des impacts anthropiques, l'alimentation humaine joue un rôle prépondérant : il est ainsi estimé que 20 à 30% des impacts environnementaux générés en Europe sont directement liés à notre alimentation (Tukker et al., 2006). La réduction des impacts environnementaux liés à l'alimentation apparaît donc comme incontournable afin de réduire les impacts environnementaux globaux liés aux activités humaines. Pour y parvenir, plusieurs actions peuvent être menées en parallèle par différents acteurs de la chaîne de valeur. On peut citer par exemple l'évolution des pratiques agronomiques (ex : agroécologie), les actions RSE menées au sein des industries agroalimentaires ou encore l'évolution des comportements des consommateurs.

L'amélioration de la performance environnementale des produits alimentaires fait également partie des actions pouvant être menées. Néanmoins, cette amélioration ne doit pas se faire au détriment d'autres dimensions de la qualité importantes aux yeux des acteurs de la chaîne de valeur, ni de la réglementation.

De ce fait, la problématique de cette thèse est : comment évaluer la qualité environnementale pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception de produits alimentaires ?

Cette problématique implique deux niveaux d'analyse. Le premier est relatif à l'évaluation de la qualité environnementale lorsque celle-ci s'applique à des produits alimentaires et aux difficultés méthodologiques associées. Le deuxième porte sur le couplage de cette qualité environnementale à d'autres dimensions de qualité dans une optique de conception de produits alimentaires. La notion de qualité des produits alimentaires est très large. Au cours de cette thèse, nous nous intéresserons à certaines facettes de cette qualité sans pour autant viser à définir exhaustivement cette notion. L'UMR SayFood, au sein de laquelle s'est déroulée la thèse, conduit des travaux en lien avec la transformation des produits agricoles en aliments et bioproduits par des approches relevant notamment des sciences des aliments. C'est donc à travers ce prisme que sera abordée cette notion de qualité et plus largement la problématique de la thèse. Un apport des sciences de gestion permet d'intégrer dans la réflexion la façon dont les entreprises gèrent ces dimensions de qualité dans leurs organisations et plus particulièrement dans leurs processus de conception.

Afin de répondre à la problématique de la thèse, les quatre principaux axes de recherche présentés sur la Figure 1 seront explorés.

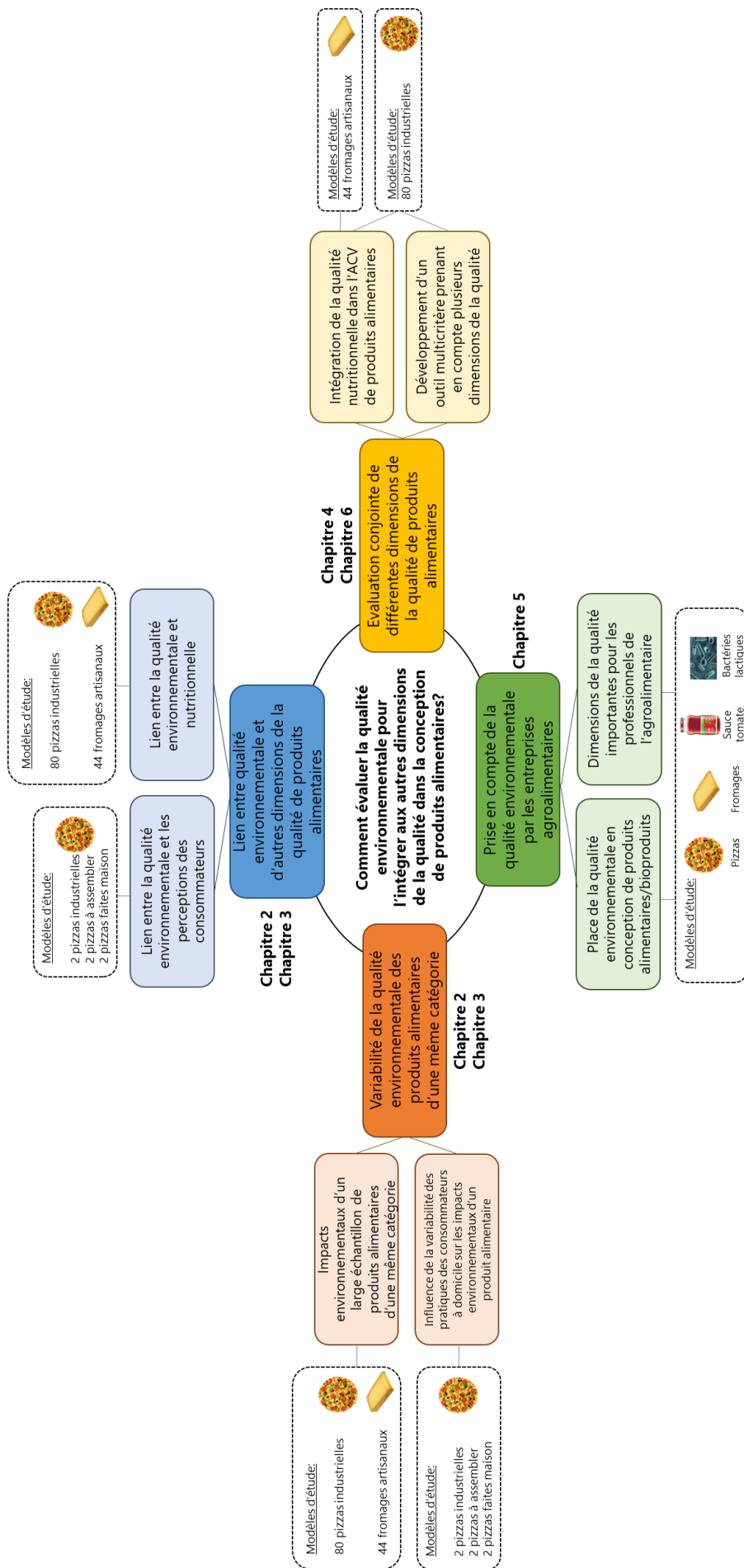


Figure 1 : Schéma général des axes de recherche de la thèse et modèles d'étude associés

1) Etudier la variabilité de la qualité environnementale des produits alimentaires d'une même catégorie et identifier des leviers d'écoconception.

Une première question qui se pose pour répondre à la problématique est de savoir à quel niveau la conception doit se placer : aliment ou catégorie de produit ? Il est en effet bien documenté que différentes catégories de produits peuvent avoir des impacts environnementaux très différents, mais nous disposons de très peu d'éléments pour savoir ce qu'il en est au sein d'une même catégorie de produits. Notre hypothèse est que la variabilité des impacts environnementaux intra-catégorie de produits est suffisamment importante pour permettre des actions d'écoconception ayant un effet significatif et donc que la conception doit se traiter à l'échelle de l'aliment. Le terme « catégorie » est ici utilisé pour désigner un ensemble de produits alimentaires portant une dénomination commune, comme par exemple la catégorie « pizzas ».

2) Caractériser le lien entre la dimension environnementale et d'autres dimensions de la qualité d'un produit alimentaire au sein d'une même catégorie.

Une deuxième question qui se pose pour répondre à la problématique est de savoir si l'écoconception des produits est susceptible ou non d'entraîner une altération de la performance du produit sur d'autres dimensions de qualité (notamment la qualité nutritionnelle et la qualité sensorielle). Notre hypothèse est que la dimension environnementale est parfois contradictoire à d'autres dimensions de qualité, et donc que son intégration nécessite la mise en place d'une approche particulière.

3) Clarifier comment les entreprises agroalimentaires prennent en compte la qualité environnementale.

Cet axe de recherche permettra, d'une part, d'identifier les dimensions de qualité importantes aux yeux des professionnels du secteur agroalimentaire pour un produit donné. Il permettra d'autre part de déterminer comment la dimension environnementale est prise en compte par ces entreprises. Cela permettra également de déterminer si les actions menées par les entreprises sont cohérentes ou non avec les principaux leviers d'écoconception identifiés lors de l'axe 1.

4) Proposer des méthodes permettant d'évaluer conjointement différentes dimensions de la qualité de produits alimentaires.

Cet axe de recherche vise à proposer des moyens de couplage de la dimension environnementale à d'autres dimensions de la qualité au vu des contraintes mises en relief. En particulier, deux approches seront explorées au sein de ce manuscrit. La première consiste à intégrer la dimension nutritionnelle au sein de l'UV de l'ACV. Notre hypothèse est que cette méthode est un bon moyen d'une part d'inclure conjointement les dimensions environnement et nutrition

dans l'évaluation de produits alimentaires d'une même catégorie et d'autre part de répondre aux limites posées par l'utilisation d'une UF massique pour l'ACV de produits alimentaires. La seconde approche consiste à utiliser un modèle d'aide à la décision multicritère afin de combiner la dimension environnementale à d'autres dimensions de qualité dans une optique de conception de produits alimentaires. Notre hypothèse est que cette méthode permet de discriminer des produits alimentaires d'une même catégorie en fonction de leur qualité environnementale, nutritionnelle et sensorielle et de donner des axes de re-conception permettant d'améliorer la qualité globale d'un produit ou d'un prototype.

Comme le montre la figure 1, les deux principales catégories de produits utilisées comme modèles d'étude sont la catégorie « pizzas » et la catégorie « fromages ». Ce choix de modèles d'étude a été motivé par plusieurs raisons. La première est que ces catégories incluent une grande variété de produits se distinguant de différentes manières (mode de production, ingrédients utilisés...). De plus, les fromages sont des produits issus de la transformation d'un ingrédient principal tandis que les pizzas sont des produits issus de l'assemblage de nombreux ingrédients, ce qui rend leur comparaison intéressante. Enfin, l'UMR Sayfood au sein de laquelle s'est déroulée la thèse disposait déjà, avant le début de la thèse, d'un certain nombre de données relatives à différentes dimensions de la qualité de ces deux catégories de produits (environnementale, nutritionnelle et sensorielle), constituant ainsi une première base de travail. Les modèles d'étude « sauces tomate » et « bactéries lactiques » ont également été utilisés mais seulement pour l'axe de recherche 3 dédié à l'étude de la prise en compte de la qualité environnementale par les entreprises agroalimentaires.

Les différents axes de recherche présentés dans la Figure 1 seront abordés au travers de sept chapitres.

Chapitre 1. Le premier chapitre aura pour objectif de faire l'état de l'art des différentes méthodes utilisées pour évaluer individuellement différentes dimensions de la qualité des produits alimentaires. Nous nous limiterons ici aux dimensions suivantes : qualité sanitaire, qualité sensorielle, qualité nutritionnelle et qualité environnementale. Les méthodes utilisées afin d'évaluer conjointement la qualité environnementale et d'autres dimensions de qualité seront également investiguées.

Chapitre 2. Le deuxième chapitre aura pour objectif de déterminer si la variabilité des impacts environnementaux au sein d'une catégorie de produits alimentaires est suffisamment importante pour permettre des actions d'écoconception ayant un effet significatif. Pour ce faire, la variabilité des impacts environnementaux de 80 pizzas d'une part et de 44 fromages d'autre part sera étudiée. Les liens existants entre les impacts environnementaux des produits et différentes caractéristiques nutritionnelles seront également étudiés. Nous avons considéré que l'ACV était la méthode d'évaluation environnementale à privilégier pour les calculs d'impacts environnementaux. Ce choix sera discuté au cours du manuscrit, notamment dans

les chapitres 5 et 6.

Chapitre 3. Le troisième chapitre portera également sur l'étude de la variabilité des impacts environnementaux de produits d'une même catégorie, cette fois-ci en lien avec les modes de production (notamment industriel et fait maison) ainsi que les pratiques des consommateurs (ex : moyen de transport pour faire les courses). Les perceptions de 69 consommateurs vis-à-vis de la qualité environnementale de produits d'une même catégorie fabriqués de différentes manières seront également étudiées, de même que les possibles liens entre leur appréciation des produits et la performance environnementale de ces derniers.

Chapitre 4. Le quatrième chapitre aura pour objectif d'étudier l'influence de l'utilisation d'unités fonctionnelles (UF) nutritionnelles sur le classement des performances environnementales de nombreux produits d'une même catégorie (80 pizzas et 44 fromages). En particulier, l'intérêt et les limites de cette méthode pour permettre le couplage entre les dimensions environnementale et nutritionnelle dans l'étude de produits alimentaires d'une même catégorie seront discutés.

Chapitre 5. Le cinquième chapitre présentera une étude ayant deux objectifs principaux. Le premier est d'identifier les principales dimensions de la qualité d'un produit alimentaire aux yeux des professionnels du secteur agroalimentaire. Le second est de définir la place de la dimension environnementale parmi ces autres dimensions.

Chapitre 6. Le chapitre 6 aura pour objectif d'explorer une option intéressante permettant de coupler différentes dimensions de la qualité dans une optique de conception de produits alimentaires. Ainsi, le développement d'un outil multicritère d'aide à la conception de pizzas, prenant en compte différentes dimensions de qualité sera présenté. Les dimensions incluses dans l'outil sont la dimension environnementale ainsi que deux dimensions identifiées comme étant particulièrement importantes aux yeux des professionnels de l'agroalimentaire : la dimension nutritionnelle et la dimension sensorielle.

Chapitre 7. Le dernier chapitre reviendra sur les principaux apports des travaux exposés dans le manuscrit en réponse à la problématique et en discutera les limites et perspectives.

CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART

1.1. DIMENSIONS DE LA QUALITE DES PRODUITS ALIMENTAIRES

Les préoccupations liées à la transformation des aliments n'ont cessé d'évoluer au cours du temps (Silva et al., 2018). Augusto (2020) compare ainsi les différents challenges liés à la transformation des aliments à des vagues se succédant au cours du temps (Figure 1.1). Ainsi, dès qu'un challenge est surmonté, un autre survient.

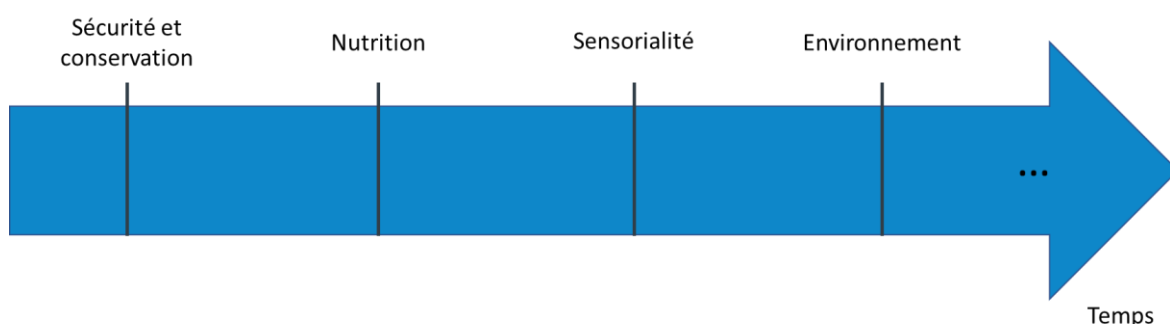


Figure 1.1. Evolution des challenges liés à la transformation alimentaire au cours du temps (figure adaptée de Augusto, 2020)

Avant les années 1950, la sécurité sanitaire des aliments ainsi que l'augmentation de leur durée de vie étaient les principaux objectifs de la transformation des aliments (Silva et al., 2018). D'autres challenges sont apparus depuis, tels que garantir une certaine qualité nutritionnelle ou sensorielle. Augusto (2020) considère la dimension environnementale comme étant la problématique à laquelle l'industrie agroalimentaire doit actuellement faire face, et que d'autres challenges sont à prévoir dans les prochaines années. Selon Saguy et al. (2013), ces futurs challenges pourraient être en lien avec différentes thématiques telles que la durabilité ou encore le développement d'aliments spécialisés à destination de populations ayant des besoins spécifiques. Augusto (2020) souligne cependant que l'émergence de nouveaux challenges n'entraîne pas l'abandon des challenges étant apparus plus tôt. Ainsi, la sécurité des produits alimentaires qui fût le premier défi à relever est encore aujourd'hui une préoccupation majeure pour les entreprises agroalimentaires, comme en témoignent les obligations réglementaires qui seront présentées dans la section 1.2.

L'ensemble des challenges présentés peuvent être considérés comme des dimensions de qualité d'un produit alimentaire. Dans l'objectif de répondre à la problématique « Comment évaluer la qualité environnementale pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception de produits alimentaires ? », nous allons dans un premier temps nous intéresser à présenter ces dimensions, à définir comment les entreprises les prennent en compte et comment elles peuvent être mesurées. Ceci permettra de mettre en évidence d'éventuelles disparités entre ces dimensions pouvant limiter leur prise en compte commune dans le cadre d'un processus de conception de produits.

1.2. QUALITE SANITAIRE

1.2.1. Evolution des enjeux au cours du temps

Les premières transformations d'aliments avaient pour objectif d'améliorer leur qualité sanitaire. Ainsi, il y a déjà 700 000 ans, la domestication du feu rendait possible la cuisson des aliments, permettant notamment de les conserver plus longtemps. De même, les hommes du Paléolithique pratiquaient déjà le séchage, le fumage et le salage afin de maintenir la qualité sanitaire des aliments le plus longtemps possible et ainsi de les conserver (Birlouez, 2019).

C'est seulement à partir du XIX^{ème} siècle que la révolution industrielle a fait émerger les industries agroalimentaires telles que nous les connaissons. A cette époque, les évolutions des techniques de conservation et des modes de transports ont permis la diffusion des produits fabriqués sur de plus larges échelles géographiques et temporelles. De même, la standardisation des processus de transformation a contribué à accroître la sécurité sanitaire des produits transformés. Ceci était notamment particulièrement important pour pouvoir alimenter les soldats au front lors de la seconde guerre mondiale (Silva et al., 2018). Ainsi, de nouveaux traitements thermiques sont mis au point dans le but de conserver les aliments toujours plus longtemps, comme c'est par exemple le cas de l'appertisation qui permet une conservation sur plusieurs années (Appert, 1813). C'est au cours des années 1950 que la première réglementation publique portant sur la transformation des aliments est mise en place aux Etats-Unis. Cette réglementation est le précurseur des contrôles sanitaires que nous connaissons aujourd'hui (Lazarides, 2012). Depuis cette époque, de nombreux progrès ont été réalisés en termes de sécurité sanitaire des produits alimentaires mais les principes des traitements thermiques utilisés pour améliorer la sécurité sanitaire et la durée de conservation des produits restent similaires. Malgré ces progrès, des scandales sanitaires liés à des produits alimentaires continuent à avoir lieu (Le Monde, 2017) montrant ainsi que la sécurité sanitaire des produits alimentaires demeure encore aujourd'hui une problématique majeure pour les professionnels de l'agroalimentaire.

1.2.2. Stratégies des entreprises agroalimentaires pour faire face à ces enjeux

Du fait de la gravité des conséquences d'une mauvaise qualité sanitaire d'un produit alimentaire sur la santé d'un consommateur (intoxications, toxi-infection alimentaires collectives, maladies, décès), la production alimentaire est encadrée par une réglementation stricte. Il existe ainsi un ensemble de textes réglementaires européens relatifs à l'ensemble de la filière alimentaire, de la production agricole jusqu'au consommateur. Cet ensemble de textes, appelé « Paquet hygiène », est entré en vigueur le 1^{er} juillet 2006. Ces textes établissent d'une part les obligations des exploitants du secteur alimentaire et, d'autre part, les modalités de contrôle que doivent mettre en œuvre les autorités compétentes (ANSES, 2013). On peut par exemple citer le règlement européen (CE) 178/2002 qui impose à l'ensemble des exploitants du secteur alimentaire de garantir la traçabilité des denrées alimentaires, aussi bien sur l'amont

que sur l'aval de la filière (Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2020).

Les entreprises agroalimentaires ont pour obligation de garantir que les produits qu'elles mettent sur le marché soient sans danger pour les consommateurs. Néanmoins, la réglementation prévoit une obligation de résultat mais pas une obligation de moyens. Pour assurer la sécurité sanitaire de leurs produits, les professionnels peuvent s'appuyer sur des guides de bonnes pratiques d'hygiène (GBPH) et peuvent rechercher une certification. L'unique norme internationale, volontaire et certifiante portant sur le management de la sécurité des denrées alimentaires est la norme ISO 22000 qui vise à aider les entreprises à savoir identifier et maîtriser les dangers liés à la sécurité des aliments et à produire des produits finaux sûrs pour le consommateur (AFNOR, 2018).

Certaines entreprises peuvent choisir de faire des contrôles qualité plus poussés que ceux imposés par la réglementation en vigueur. C'est le cas par exemple du groupe Ferrero, qui déclare sur son site internet aller au-delà de la réglementation relative aux salmonelles en effectuant les contrôles sur 750g de produit au lieu des 25g imposés par la réglementation (Ferrero, 2021).

1.2.3. Evaluation de la qualité sanitaire

1.2.3.1. Méthodes d'évaluation

Trois grandes catégories de dangers peuvent venir menacer la sécurité sanitaire des produits alimentaires : les dangers biologiques, chimiques et physiques.

Dangers biologiques : Parmi les dangers biologiques, on peut citer les bactéries sporulantes (ex : *Bacillus cereus*), les bactéries asporulantes (ex : *Listeria*, *Salmonella*, *E. coli*, *Streptococcus aureus*), les virus ou encore les protozoaires et parasites (ex : *Taenia saginata*) ainsi que les moisissures. La qualité sanitaire en lien avec les dangers biologiques peut être surveillée de différentes manières. Par exemple, il est possible de mesurer la durée et la température du traitement thermique dont l'objectif est d'inactiver des pathogènes afin de s'assurer que le traitement respecte les normes prévues pour garantir son efficacité. Afin de garantir la sécurité microbiologique des aliments, des prélèvements sont effectués sur des échantillons de produits (dont la fréquence peut varier selon le type de produit et les traitements subis) puis analysés. Les pathogènes recherchés sont différents d'une catégorie de produit à l'autre, certains produits étant plus à risques que d'autres. Les techniques utilisées peuvent être des techniques de dénombrement ou des techniques de détection. Les valeurs obtenues sont ensuite comparées aux valeurs réglementaires (FAO, 2004).

Dangers chimiques : Divers contaminants peuvent être à l'origine d'un danger chimique. On peut citer par exemple les composés chimiques naturels (ex : allergènes), les contaminants chimiques industriels (ex : pesticides, résidus d'agents de nettoyage) ou encore les contaminants issus de l'emballage des aliments (ex : encre). Ces composés peuvent être dangereux à différentes échelles temporelles. S'ils sont présents à fortes doses, certains de ces

contaminants peuvent être associés à des intoxications alimentaires. S'ils sont présents à faibles doses mais que leur consommation est répétitive, ils peuvent être à l'origine de maladies chroniques (FAO, 2004).

Dangers physiques : Un danger physique est causé par la présence d'un corps étranger dans le produit alimentaire. L'ANSES définit comme corps étranger « toute particule de matière présente dans un produit alimentaire dont la nature ou la texture n'est pas attendue par le consommateur ou le client » (ANSES, 2014). Un corps étranger peut être de différentes natures : morceau de verre, de plastique ou encore objet appartenant à un employé du site de production. Afin de s'assurer de l'absence de corps étrangers dans leurs produits, les industriels de l'agroalimentaire peuvent utiliser des détecteurs (ex : détecteur de métaux) (ANSES, 2014).

1.2.3.2. Indicateurs de qualité

Dangers biologiques : Le nombre de germes pouvant constituer un danger biologique est important. Parmi les plus fréquemment recherchés dans les denrées alimentaires, nous pouvons citer les suivants : microorganismes aérobies à 30 degrés, les coliformes totaux, coliformes fécaux, salmonelles, staphylocoques, *Listeria*, *Bacillus cereus*, *Escherichia coli*, et *Clostridium perfringen*, ou encore les germes anaérobies sulfito-réducteurs. Les seuils à respecter sont différents selon les catégories de produits. Le règlement (CE) n°2073/2005 fixe les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires (Commission européenne, 2005). Il convient de distinguer les critères de sécurité des denrées alimentaires des critères d'hygiène des procédés. Les critères de sécurité des denrées alimentaires définissent si un produit mis sur le marché est acceptable ou non. Les critères d'hygiène des procédés permettent quant à eux de définir si le fonctionnement d'un procédé de production est acceptable ou non (Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2009).

Dans certains cas, une absence totale du microorganisme en question est nécessaire pour définir une qualité satisfaisante du produit. Dans d'autres cas, deux valeurs seuils sont fixées, m et M. Il est alors considéré que la qualité est satisfaisante lorsque la moyenne quotidienne est inférieure à m, acceptable lorsqu'elle est comprise entre m et M et insuffisante lorsqu'elle est supérieure à M. Par exemple, pour les fromages subissant un traitement thermique à une température inférieure à celle de la pasteurisation, il faut une absence de *salmonella* dans 25g (Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2009).

Dangers chimiques : Il existe également des seuils à respecter dans le cadre des dangers chimiques. Par exemple, en ce qui concerne les produits phytosanitaires, il existe des limites maximales de résidus (LMR) qui ne doivent pas être dépassées dans les aliments. Il s'agit des niveaux maximaux légaux de concentrations en résidus de pesticides au sein d'un produit alimentaire. Les produits alimentaires finaux doivent obligatoirement avoir des concentrations en pesticides inférieures à ces seuils. Les seuils LMR ont été établis de manière à ce que les quantités de résidus qu'un individu est susceptible de retrouver quotidiennement dans son alimentation soient inférieures aux seuils toxicologiques (Ministère de l'agriculture et de la

souveraineté alimentaire, 2013).

Dangers physiques : Dans le cas des dangers physiques, c'est l'absence totale de corps étrangers qui est visée.

1.2.4. Conclusions sur la qualité sanitaire

Comme cela a été montré dans les paragraphes précédents, la qualité sanitaire des produits alimentaires est régie par des textes réglementaires auxquels des certifications normatives peuvent venir s'ajouter. Le degré de liberté d'action des entreprises agroalimentaires en la matière est de ce fait restreint, certains seuils ne pouvant pas légalement être franchis. Ainsi, la qualité sanitaire constitue la dimension de qualité des produits alimentaires la plus ancestrale et est aujourd'hui encore au cœur des préoccupations des industriels mais également des consommateurs qui doivent régulièrement faire face à des scandales sanitaires. De ce fait, il apparaît que la qualité sanitaire ne constitue pas une dimension sur laquelle les concepteurs de produits alimentaires peuvent avoir d'importants leviers d'actions.

1.3. QUALITE SENSORIELLE

1.3.1. Evolution des enjeux au cours du temps

Les caractéristiques sensorielles d'un aliment correspondent à ses impacts sur les 5 sens : odorat, goût, toucher, vue et audition (Lefebvre et Bassereau, 2003). Les réflexions en lien avec l'amélioration de la qualité sensorielle des produits alimentaires ont commencé au cours des années 1940-1950, notamment au sein de l'armée américaine dans le but d'optimiser l'acceptabilité des aliments fournis aux soldats (Meiselman et Schutz, 2003). De plus, le contexte d'après-guerre des années 50 engendre de nombreux changements dans les modes de vie des consommateurs ainsi que dans leurs habitudes alimentaires. En particulier, l'émancipation des femmes entraîne une réduction de leur temps passé en cuisine, ce qui donne lieu à une recherche de produits alimentaires plus rapides à préparer. Pour répondre à cette demande, l'industrie agroalimentaire propose de plus en plus de plats prêts à cuisiner ou à consommer et l'émergence des supermarchés permet aux consommateurs de se les procurer plus facilement. Le fait de commercialiser des produits prêt-à-consommer implique la nécessité que ces derniers soient appréciés des consommateurs sur le plan sensoriel. Ainsi, pour la première fois, le consommateur est au centre de l'innovation (Bruin and Jongen, 2006). Le terme « analyse sensorielle » semble pour autant n'avoir été employé en tant que tel qu'à partir de 1961 (Depledge et Sauvageot, 2002). C'est au cours des années 1970 que les premières études sensorielles sont réalisées dans le but de produire des aliments toujours plus savoureux et attrayants tout en restant pratiques et abordables financièrement (Augusto, 2020). Actuellement, la qualité sensorielle est une dimension particulièrement importante à prendre en compte par les entreprises agroalimentaires puisqu'elle est considérée comme une dimension majeure dans le choix des consommateurs. En particulier, la qualité gustative

constitue le deuxième critère de choix de produits alimentaires chez les français, le premier étant le prix (Opinionway pour Sofinscope, 2015).

1.3.2. Stratégies des entreprises agroalimentaires pour faire face à ces enjeux

Il n'existe pas de contraintes réglementaires visant à garantir une certaine qualité sensorielle des produits alimentaires mis sur le marché. En revanche, il existe des normes descriptives des bonnes pratiques pour la réalisation des procédures d'analyse sensorielle. Par exemple, la norme ISO 11136 établit des lignes directrices pour la réalisation d'épreuves hédoniques dans un espace contrôlé (ISO, 2017). Néanmoins, aucune norme ou guide de bonnes pratiques n'encadre les stratégies de reformulation ayant pour objectifs d'améliorer la qualité sensorielle d'un produit. Les entreprises sont ainsi libres d'appliquer ou non des stratégies d'amélioration de la qualité sensorielle de leur produit. Les modes d'action pour prendre en compte la qualité sensorielle des produits alimentaires sont variés. Ainsi, certaines entreprises possèdent une unité dédiée à l'évaluation sensorielle et leur propre laboratoire associé. Pour les autres, il est également possible de faire ponctuellement appel à un prestataire afin de réaliser des analyses sensorielles de leurs produits (Depledge et Sauvageot, 2002). Ainsi, les analyses sensorielles sont le plus souvent des démarches qui incluent des consommateurs dans les processus de conception de produit.

1.3.3. Evaluation de la qualité sensorielle

1.3.3.1. Méthodes d'évaluation

L'analyse sensorielle se définit comme étant « l'examen des propriétés organoleptiques d'un produit par les organes des sens » (ISO, 2009). L'analyse sensorielle de produits alimentaires peut être employée pour répondre à divers objectifs tels que comparer plusieurs prototypes, déterminer le degré de ressemblance entre un prototype et un produit existant sur le marché ou encore étudier l'évolution des caractéristiques sensorielles d'un produit suite à une reformulation. Une analyse sensorielle nécessite de faire intervenir un panel sensoriel auquel il peut être demandé d'évaluer ou comparer des produits avant, pendant mais également après leur ingestion. Les panélistes doivent alors répondre à une série de questions relatives à leurs perceptions organoleptiques et/ou hédoniques. Le choix de ce panel sensoriel se fait selon les objectifs de l'étude. Le panel pourra ainsi être représentatif d'une population particulière à laquelle le produit s'adresse (ex : enfants). Il pourra s'agir d'un panel naïf ou d'un panel ayant été entraîné (Lefebvre et Bassereau, 2003). L'analyse sensorielle peut faire intervenir différents types d'épreuves.

Epreuves discriminatives : Les épreuves discriminatives ont pour objectif de mettre en évidence si des différences sensorielles existent ou non entre différents produits (Lefebvre et Bassereau, 2003). Elles peuvent faire intervenir un nombre varié d'échantillons présentés simultanément à chaque panéliste. Parmi les exemples les plus connus de tests discriminatifs, on peut citer « l'épreuve triangulaire » au cours de laquelle trois échantillons sont présentés simultanément au panéliste, dont deux proviennent d'un même produit. Le panéliste doit alors, pour chaque lot d'échantillons présentés, définir quel échantillon est différent des deux autres (Depledge et Sauvageot, 2002).

Epreuves descriptives : Les épreuves descriptives sont utilisées afin de mesurer l'intensité de la sensation perçue par les panélistes vis-à-vis des différents descripteurs étudiés. Les descripteurs ainsi évalués serviront ensuite à réaliser le profil sensoriel du produit (Lefebvre et Bassereau, 2003). Un exemple d'épreuve descriptive est l'épreuve de classement qui consiste à donner plusieurs échantillons au panéliste qui devra les classer du plus au moins intense selon le descripteur étudié.

Epreuves hédoniques : L'évaluation hédonique s'intéresse à l'appréciation du produit par les panélistes (Lefebvre et Bassereau, 2003). Ainsi, l'évaluation hédonique ne s'intéresse pas directement au produit mais à la manière dont le produit procure du plaisir au consommateur. Les épreuves hédoniques peuvent avoir pour objectif d'évaluer la préférence des consommateurs. Dans ce cas, il pourra être demandé au panéliste de classer différents produits du plus au moins apprécié ou encore de choisir le produit qu'il préfère parmi une paire. Les épreuves hédoniques peuvent également servir à évaluer l'acceptabilité d'un produit. Le panéliste devra alors décrire son degré d'appréciation du produit, sur une échelle par exemple (Lefebvre et Bassereau, 2003).

La nature des données pouvant être collectées par analyse sensorielle sont variées. Il peut s'agir d'une valeur absolue (par exemple si l'objectif est de mesurer l'intensité d'un descripteur ou encore le degré d'appréciation d'un produit), d'un classement (par exemple si l'objectif est de classer différents produits selon leur intensité vis-à-vis d'un descripteur ou de classer les produits selon leur degré d'appréciation par le consommateur) ou encore de tri (si par exemple l'objectif est de déterminer si deux produits sont perçus ou non comme différents). L'ensemble des données collectées au cours des séances d'évaluation sensorielle est ensuite traité par des analyses statistiques afin de répondre à l'objectif de l'étude.

1.3.3.2. Indicateurs de qualité

Outre la qualité hédonique, la qualité sensorielle d'un produit est étudiée à l'aide de descripteurs sensoriels. Ces derniers sont très nombreux et peuvent fortement varier selon l'objectif de l'étude et le type de produit étudié. Ils peuvent être établis par un panel ou alors être prédéfinis par les organisateurs de l'étude. Lors de la réalisation d'un profil sensoriel, les descripteurs choisis doivent être pertinents, précis, unidimensionnels, discriminants, exhaustifs, non redondants et non hédoniques (Lawless et Heymann, 1998). Les descripteurs peuvent être

en lien avec chacun des 5 sens. A titre d'exemple, la figure 1.2. présente une roue des arômes utilisée dans le cadre d'analyses sensorielles de fromages à pâtes dures et mi-dures.



Figure 1.2. Roue des arômes des fromages à pâtes dures et mi-dures (Agroscope, 2012)

Cette roue expose différents arômes descriptifs de ces types de fromage selon plusieurs sous catégories (lactique, végétal, floral, fruité, brun, animal, épicé, autre). Chaque catégorie est subdivisée en plusieurs descripteurs sensoriels, pour un total de 72 descripteurs. Cet exemple illustre bien la variété possible des descripteurs. Aux descripteurs d'arômes s'ajoutent également des descripteurs en lien avec d'autres dimensions sensorielles telles que la texture ou encore l'aspect visuel.

1.3.4. Conclusions sur la qualité sensorielle

Contrairement à la qualité sanitaire, il n'existe pas de réglementation visant à garantir une certaine qualité sensorielle des produits alimentaires pour les consommateurs. Ainsi, les

entreprises sont libres de mettre en place ou non des actions visant à s'assurer de la bonne qualité sensorielle d'un produit. La dimension sensorielle n'en demeure pas moins importante puisqu'elle constitue le principal critère de choix pour les consommateurs après le prix. La qualité sensorielle diffère également de la qualité sanitaire par le fait que son évaluation implique des consommateurs. Les analyses sensorielles peuvent ainsi engendrer des résultats d'ordre quantitatif (ex : intensité perçue d'une saveur) ou d'ordre plus qualitatif (comme par exemple une préférence).

1.4. QUALITE NUTRITIONNELLE

1.4.1. Evolution des enjeux au cours du temps

A partir des années 1980, l'évolution des connaissances scientifiques a permis d'identifier des liens entre la qualité nutritionnelle des régimes alimentaires et la prévalence de pathologies métaboliques dans les pays occidentaux. Cette nouvelle perception a donné lieu à une augmentation de l'intérêt des consommateurs vis-à-vis de la qualité nutritionnelle des produits achetés (Silva et al, 2018). De même, l'intérêt pour cette dimension augmente aussi auprès des politiques publiques européennes qui doivent protéger les citoyens et essayer de limiter les coûts de prise en charge des frais de santé. De ce fait, l'amélioration de la qualité nutritionnelle de leurs produits est devenue un nouvel objectif pour les industriels de l'agroalimentaire entraînant des vagues de reformulation des produits alimentaires (Van Raaij et al., 2009). Ces actions ont commencé à être menées par les entreprises dès les années 90 mais se sont intensifiées depuis les années 2000. Dans ce contexte, la reformulation consiste alors à réduire, voire à supprimer certains composés tout en maintenant les caractéristiques du produit perçues positivement par les consommateurs telles que ses caractéristiques sensorielles ou encore sa durée de vie (Van Raaij et al., 2009). Les composés à réduire sont notamment les acides gras saturés, le sel ainsi que les sucres libres (OMS, 2004). C'est également à cette époque que sont développés les aliments dits « fonctionnels » qui sont des aliments enrichis à l'aide d'un ingrédient fonctionnel. Les snacks enrichis en fibres ou encore des yaourts enrichis en probiotiques font partie de cette catégorie (Silva et al, 2018). Ces reformulations sont ainsi en accord avec les recommandations du PNNS (Programme National Nutrition Santé) visant à orienter les choix des consommateurs en ce sens (Ministère des solidarités et de la santé, 2019).

1.4.2. Stratégies des entreprises agroalimentaires pour faire face à ces enjeux

Depuis 2016, les industriels ont l'obligation d'apposer une déclaration nutritionnelle sur tout produit alimentaire pré-emballés. Cette déclaration doit contenir les informations suivantes : valeur énergétique, teneurs en matières grasses, acides gras saturés, glucides, sucres, protéines, et sel pour 100g de produit. D'autres indications nutritionnelles peuvent également être ajoutées sur la base du volontariat, par exemple des teneurs en vitamines, en minéraux ou encore en fibres alimentaires (Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté

industrielle et numérique, 2019). Les entreprises ont ainsi l'obligation de communiquer sur les teneurs nutritionnelles de leurs produits. Néanmoins, à ce jour, il n'existe pas de réglementation imposant aux industriels de formuler/reformuler leurs produits afin d'en garantir une certaine qualité nutritionnelle. Les entreprises sont cependant encouragées à mettre en place ce type de démarche par les pouvoirs publics qui établissent des plans d'action visant à améliorer la qualité nutritionnelle des régimes alimentaires des français.

La PNAN (Programme national de l'alimentation et de la nutrition) établit les objectifs du gouvernement sur 5 ans en matière d'alimentation et de nutrition. Deux principaux plans sont associés à ce programme. Il s'agit du PNA (Plan National de l'Alimentation) et du PNNS. Le PNA est un programme piloté par le ministère de l'agriculture et de l'alimentation visant à inciter les acteurs du secteur agroalimentaire à promouvoir notamment la transition agroécologique, les circuits courts ainsi que les productions labellisées « agriculture biologique ». Le PNNS est quant à lui un plan piloté par le ministère des solidarités et de la santé ayant pour objectif d'améliorer la santé de la population française via une amélioration de la qualité nutritionnelle de leurs régimes (République française, 2019). Pour ce faire, le PNNS s'appuie sur l'analyse de la situation nutritionnelle de la population à travers des études récentes, telles que l'étude INCA3 par exemple. Le premier PNNS a été publié en 2001 (PNNS 1) et a depuis été actualisé à plusieurs reprises. Actuellement, c'est le PNNS 4 qui est en vigueur (2019-2023). Le PNNS 4 fait état de 24 objectifs (Ministère des solidarités et de la santé, 2019). L'objectif 1 concerne l'amélioration de la qualité nutritionnelle des aliments. Parmi les actions prévues pour atteindre cet objectif, on retrouve l'action suivante : « augmentation des fibres et réduction du sel, du sucre et du gras dans les aliments de consommation courante par un engagement ferme des acteurs économiques dès 2020 ». Les entreprises agroalimentaires sont ainsi appelées à reformuler leurs produits sur la base d'engagements volontaires. Pour ce faire, l'ANSES a été saisie afin de fournir des éléments permettant d'établir des seuils de reformulation réalistes et atteignables par catégorie ou famille d'aliments transformés (Ministère des solidarités et de la santé, 2019). Les entreprises désireuses de s'engager dans une démarche d'amélioration nutritionnelle de leurs produits peuvent ainsi signer des « chartes d'engagements volontaires de progrès nutritionnel ». Elles s'engagent ainsi à améliorer la qualité nutritionnelle de leurs produits en accord avec les objectifs du PNNS, notamment via la diminution du sel, des sucres, des acides gras saturés et/ou l'augmentation des fibres ou des glucides complexes (Ministère de la santé et de la prévention, 2022). Il est également mentionné dans le PNNS que si ces objectifs venaient à ne pas être atteints sur la base du volontariat, une réglementation pourrait être mise en place (Ministère des solidarités et de la santé, 2019).

Les entreprises peuvent également mettre en place leur propres stratégies d'amélioration de la qualité nutritionnelle de leurs produits. C'est le cas par exemple de Danone qui, dans son document de référence datant de 2017, s'engageait à ce que 100% de ses produits atteignent certaines valeurs cibles d'ici 2020 telles que 7 grammes de sucres ajoutés et 2.5g d'acides gras saturés pour 100g de yaourt (Danone, 2017).

1.4.3. Evaluation de la qualité nutritionnelle

1.4.3.1. Méthodes d'évaluation

Les besoins nutritionnels sont variables d'un individu à l'autre et de ce fait, un régime alimentaire de bonne qualité nutritionnelle pour un individu peut ne pas l'être pour un autre. Par exemple, les besoins en énergie d'un individu varient en fonction de son activité physique, de son âge, de son sexe et de sa taille (Henry, 2005). Ainsi, bien qu'il soit impossible de déterminer les besoins nutritionnels exacts d'un individu, il est toutefois possible de se référer à des références nutritionnelles établies pour la sous-population à laquelle appartient l'individu. Les références nutritionnelles fixées par l'ANSES regroupent le Besoin Nutritionnel Moyen (BNM), la Référence Nutritionnelle pour la Population (RNP), l'Apport Satisfaisant (AS), et la Limite Supérieure de Sécurité (LSS). La RNP traduit l'apport couvrant le besoin de la quasi-totalité de la population (97.5%). L'AS correspondant à l'apport moyen d'une population pour lequel le statut nutritionnel est considéré comme étant suffisant. La LSS correspond à l'apport journalier maximal pour lequel les effets indésirables sur la santé sont peu probables (ANSES, 2016).

Afin de déterminer les teneurs d'un produit alimentaire en ces différents nutriments, il est possible de les mesurer expérimentalement. Il existe également des bases de données contenant des valeurs nutritionnelles moyennes pour différents aliments. En France, la table CIQUAL gérée par l'ANSES est la base de données de référence recensant les compositions nutritionnelles de 3185 aliments (ANSES, 2017). Une fois les teneurs d'un produit alimentaire en différents nutriments obtenues, l'adéquation du produit aux recommandations nutritionnelles peut être étudiée. Cela peut par exemple se faire par l'intermédiaire de scores nutritionnels dont certains seront présentés dans le paragraphe suivant.

1.4.3.2. Indicateurs de qualité nutritionnelle

Les teneurs nutritionnelles disponibles sur la déclaration nutritionnelle présente sur les emballages des produits pré-emballés constituent un ensemble d'indicateurs de qualité nutritionnelle. Il existe, en complément des teneurs nutritionnelles, des scores agrégés permettant de déterminer si un régime alimentaire ou encore un produit alimentaire peut être considéré comme de bonne qualité nutritionnelle ou non, en fonction de son adéquation aux recommandations nutritionnelles relatives à une population donnée.

De nombreux scores nutritionnels ont été développés à travers le monde. En général, chacun d'entre eux se base sur les recommandations nutritionnelles en vigueur dans la région du monde au sein de laquelle il a été développé et reflète les spécificités des besoins des populations locales. Ici, nous nous limiterons à présenter les principaux indicateurs de qualité nutritionnelle utilisés en France.

Parmi eux, certains sont destinés à évaluer la qualité nutritionnelle d'un régime alimentaire,

c'est le cas par exemple du PNNS Guideline-score 2 qui permet d'évaluer la qualité nutritionnelle de l'alimentation en la comparant aux recommandations nutritionnelles du PNNS. Pour calculer ce score, différents critères sont utilisés tels que le nombre de fruits et légumes, la quantité de légumes secs, de viande rouge ou encore de sel consommés par jour. Chacun des critères se voit attribuer une note, pouvant aller de -2 à 2 selon les critères, en fonction de leur adéquation aux recommandations nutritionnelles du PNNS (Chaltiel et al., 2019).

A l'échelle de l'aliment, plusieurs systèmes de profilages nutritionnels ont été développés en France. Deux des plus connus sont le système SAIN, LIM et le Nutri-Score, tous deux développés dans une optique d'affichage nutritionnel des produits alimentaires.

1.4.3.2.1. Système SAIN, LIM

Comme son nom l'indique, le système SAIN, LIM repose sur deux scores différents : le SAIN qui comprend des nutriments à favoriser et le LIM qui comprend des nutriments à limiter (Darmon et al., 2009). Le SAIN (Score d'adéquation individuel aux recommandations nutritionnelles) est calculé en utilisant les équations (1) et (2) (Darmon et al., 2009).

$$SAIN = \frac{\sum_{p=1}^{p=5} \text{ratio } ip}{5} * 100 \quad (1)$$

$$\text{Ratio } ip = \left[\frac{\text{masse de nutriment (g,mg,}\mu\text{g/100g)}}{\text{Masse de nutriment recommandée/jour}} \right] * \frac{100}{\text{teneur énergétique } (\frac{kcal}{100g})} \quad (2)$$

Les nutriments de base inclus dans le SAIN sont les protéines, les fibres, la vitamine C, le calcium et le fer mais d'autres nutriments peuvent être ajoutés en fonction du produit étudié. Contrairement au SAIN qui est un score de densité nutritionnelle (ratio nutriments/énergie), le LIM ne prend pas en compte la teneur énergétique du produit. Il se calcule comme présenté dans les équations (3) et (4) (Darmon et al., 2009).

$$LIM = \frac{\sum_{l=1}^{l=3} \text{ratio } il}{3} \quad (3)$$

$$\text{ratio } il = \left[\frac{\text{masse de nutriment (g,mg,}\mu\text{g/100g)}}{\text{Masse de nutriment max/jour}} \right] * 100 \quad (4)$$

Les nutriments à limiter inclus dans le score LIM sont les acides gras saturés, le sodium ainsi que les sucres ajoutés.

Un aliment a un bon score SAIN lorsque la valeur calculée est supérieure ou égale à 5 et un mauvais LIM lorsque ce dernier est supérieur ou égal à 7.5. Ceci permet de classer les produits alimentaires en 4 catégories : bon LIM et bon SAIN, mauvais LIM et mauvais SAIN, bon LIM et mauvais SAIN et mauvais LIM et bon SAIN.

Le système SAIN, LIM de base a été adapté en vue de l'affichage nutritionnel, permettant ainsi d'aboutir au système SENS (Système d'Etiquetage Nutritionnel Simplifié). Le SAINsens se

calcule selon l'équation (5) (Tharrey et al., 2017).

$$SAINsens = \frac{\left(\frac{Fruit\&vegetables}{10} + \frac{Proteins}{50} + \frac{Fibres}{20} + \frac{NutCat * Weight}{Ref\ NutCat} \right)}{4} * 100 \quad (5)$$

Avec *Fruit&vegetables* la teneur en fruits et légumes du produit (g/g) ; *Proteins* la masse de protéines dans 100kcal de produit (g/100kcal), *Fibres* la masse de fibres dans 100kcal de produit (g/100kcal), *NutCat* un nutriment pouvant être ajouté pour certaines catégories de produit, *Weight* le poids à attribuer à ce nutriment et *RefNutCat* la masse de ce nutriment qu'il est conseillé de consommer chaque jour.

Les paramètres de base pris en compte par le SAINsens sont les teneurs en protéines et en fibres (g/100kcal) du produit ainsi que la teneur en fruits et légumes (g/g) mais des paramètres complémentaires peuvent être utilisés en fonction de la catégorie de produits étudiée, comme par exemple le calcium pour les fromages. De plus, le poids alloué à chacun des paramètres peut varier selon le type de produit étudié (par exemple, le poids attribué aux fibres sera plus élevé pour un produit céréalier que pour un autre produit) afin de valoriser les nutriments d'intérêt pouvant se trouver dans certaines catégories de produits alimentaires.

La formule de calcul du LIMsens est présentée dans l'équation 6 (Tharrey et al., 2017).

$$LIMsens = \frac{\frac{Sodium}{2400} + \frac{SFA}{20} + \frac{free\ sugar}{50}}{3} * 100 \quad (6)$$

Avec sodium la masse de sodium dans 100g de produit (mg/100g), SFA la masse d'acides gras saturés dans 100g de produit (g/100g), free sugar la masse de sucres libres dans 100g de produit (g/100g).

1.4.3.2.2. Le Nutri-Score

Le Nutri-Score est un score nutritionnel dérivé de l'algorithme de l'indice nutritionnel FSA-NPS consistant à soustraire un score Y reflétant les teneurs d'un produit en composants à favoriser à un score X reflétant les teneurs d'un produit en nutriments à limiter. Les composants à favoriser pris en compte dans le Nutri-Score sont la teneur en fibres, la teneur en protéines, ainsi que la teneur en fruits, légumes, légumineuses, fruits à coques et certaines huiles. Les teneurs à limiter sont les teneurs en énergie, sucres, graisses saturées, et sodium. Ainsi, dans un premier temps, une note de 0 à 10 est attribuée à chacune des quatre teneurs à limiter (énergie, sucres, graisses saturées, sodium) selon une grille de référence. Plus la teneur est haute et plus la note sera proche de 10. Les quatre notes ainsi obtenues sont alors sommées pour former le score X. Le même principe est appliqué pour calculer le score Y : Une note de 0 à 5 est attribuée à chacune des trois teneurs en composants à favoriser (plus la teneur est haute et plus la note sera proche de 5). Les trois notes ainsi obtenues sont alors sommées pour former le score Y. On peut alors calculer le score Z tel que score Z = Score X – score Y (Chantal et Hercberg, 2017). En fonction du score obtenu, l'aliment se voit attribuer une certaine couleur via un logo de type « ABCDE ». Chaque couleur correspond à une échelle de point : vert foncé (-15 à -1 points), vert clair (0 à 2 points), jaune (3 à 10 points), orange clair (11 à 18 points),

orange foncé (19 points et plus). Néanmoins, le 26 juillet 2022, le comité scientifique travaillant sur le Nutri-Score a voté en faveur d'une évolution de l'algorithme de ce dernier (Santé publique France, 2022). Les modifications à prévoir concernent des valeurs seuils, des modifications dans les scores permettant d'affilier le produit à l'une ou l'autre des couleurs et un retrait des fruits à coques et des huiles de la catégorie « fruits et légumes » (pour l'algorithme principal uniquement) (Scientific Committee of the Nutri-Score, 2022). A l'heure actuelle, le Nutri-Score est la seule forme de représentation graphique sur les emballages alimentaires à être recommandée par l'Etat français. Contrairement à la déclaration nutritionnelle qui est obligatoire, l'affichage du Nutri-Score sur les emballages alimentaires est, pour le moment, facultative.

1.4.4. Conclusions sur la qualité nutritionnelle

Bien qu'il n'existe pas de réglementation visant à garantir la qualité nutritionnelle d'un produit alimentaire, la prise en compte de cette dernière par les entreprises agroalimentaires est fortement recommandée par les pouvoirs publics du fait de l'influence de la qualité nutritionnelle des régimes sur la prévalence de certaines maladies. De plus, la demande des consommateurs pour des produits de meilleure qualité nutritionnelle est croissante, ce qui encourage les industriels à œuvrer dans cette voie et à concevoir des produits de meilleure qualité nutritionnelle. Pour cela, la qualité nutritionnelle peut être mesurée de différentes manières. D'une part, elle peut être évaluée de manière quantitative (ex : teneur en protéines dans 100g de produit). D'autre part, elle peut être exprimée de manière plus qualitative, sous forme de score ou encore de lettre traduisant la qualité nutritionnelle d'un produit alimentaire par son adéquation à des recommandations nutritionnelles relatives à une population donnée.

1.5. QUALITE ENVIRONNEMENTALE

1.5.1. Evolution des enjeux au cours du temps

Les préoccupations liées à la performance environnementale des produits alimentaires sont relativement récentes par rapport aux dimensions présentées jusqu'à présent (Augusto, 2020). Pour autant, les problèmes environnementaux liés à l'alimentation humaine sont importants et chacune des étapes de la chaîne de valeur y contribue. Notre alimentation joue notamment un rôle majeur dans les émissions de gaz à effet de serre, la consommation d'eau et d'énergie, la déforestation ou encore, perte de biodiversité (Garnett, 2013). La pression environnementale liée à l'alimentation est amenée à augmenter dans les années à venir du fait de l'augmentation continue de la population mondiale (ONU, 2017). Une transition du système alimentaire semble donc nécessaire. Garnett (2013) souligne d'ailleurs le manque d'efficacité du système alimentaire actuel, avec, d'une part une partie de la population mondiale qui n'a pas accès à suffisamment de nourriture pour pouvoir atteindre ses besoins nutritionnels et d'autre part une partie de la population qui consomme trop de nourriture et doit faire face à des problèmes de

santé associés. Il en est de même pour l'énorme gaspillage alimentaire. La FAO estime notamment qu'un tiers des aliments produits dans le monde sont gaspillés, et ceci tout au long de la chaîne de valeur, ce qui représente 1.3 milliard de tonnes (FAO, 2014).

Face à ces constats alarmants, l'intérêt pour cette dimension semble grandissant pour tous les acteurs de la chaîne de valeur alimentaire. Par exemple, un sondage réalisé par Ipsos (2016) a montré que 47% des personnes interrogées déclaraient consommer davantage de produits considérés comme à faibles impacts environnementaux qu'il y a deux ans. De même, un sondage réalisé par BVA (2018) a montré que 47% des personnes interrogées mentionnent la réduction des impacts environnementaux liés à l'alimentation comme un sujet nécessitant de faire davantage d'efforts. Il en est de même pour les politiques publiques. On peut par exemple constater que le PNAN (République française, 2019) inclue dans ses six axes d'actions concrètes à court terme l'objectif d'une alimentation plus durable et solidaire. Différentes lois et actions des entreprises agroalimentaires allant en ce sens seront présentées dans le paragraphe suivant.

1.5.2. Stratégies des entreprises agroalimentaires pour faire face à ces enjeux

Actuellement, plusieurs lois ont été publiées dans le but de réduire les impacts environnementaux liés aux activités des entreprises. On peut citer par exemple la loi de transition énergétique pour la croissance verte qui vise à lutter contre le dérèglement climatique et à préserver l'environnement via une réduction de la consommation énergétique globale combinée à une augmentation de la proportion d'énergies renouvelables utilisées par rapport à l'énergie totale (Ministère de la transition écologique, 2017). De même, la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages impose notamment aux entreprises de prévenir et réparer les préjudices écologiques causés. Ainsi, toute action considérée comme une atteinte à la biodiversité devra être compensée dans un objectif « d'absence de perte nette, voire de gain, de biodiversité » (République française, 2016). La loi AGECL (Anti-Gaspillage pour une Economie Circulaire) fixe quant à elle l'objectif de réduire le gaspillage alimentaire de 50% entre 2015 et 2025 dans les domaines de la production, de la transformation et de la consommation. Pour y parvenir, cette loi prévoit notamment une meilleure information du consommateur via une mention informative pour les produits à date de durabilité minimale, rappelant que le produit peut être consommé en toute sécurité passé cette date (Ministère de la transition écologique, 2022a). Un des autres objectifs de cette loi est l'arrêt de l'utilisation des emballages plastiques à usage unique d'ici 2040. Toujours dans un souci d'information des consommateurs, ainsi que pour encourager les entreprises à éco-concevoir leurs produits, le gouvernement souhaite depuis plusieurs années mettre en place un affichage environnemental des produits alimentaires. Les démarches liées à l'affichage environnemental ont débuté en 2009 dans le cadre du Grenelle de l'environnement. Elles ont par la suite été reprises par la loi de la transition énergétique pour la croissance verte en 2015. Depuis 2013, l'affichage environnemental encadré se fait sur la base du volontariat sur différentes catégories de produits, dont les produits alimentaires (ADEME, 2021). En 2020, la loi AGECL a lancé une

expérimentation de 18 mois visant à définir la méthodologie à adopter pour la mise en place de l’affichage environnemental qui pourra à terme être rendu obligatoire (ADEME, 2021).

En plus de ces obligations légales, l’entreprise peut également s’engager volontairement dans une démarche de réduction de ses impacts environnementaux. Il existe différentes normes pouvant l’y aider. Parmi elles, certaines sont certifiantes et d’autres pas. Les deux paragraphes suivants présentent les deux principales familles de normes traitant de la réduction des impacts environnementaux en entreprise.

Famille des normes ISO 26000 (International Organisation for Standardisation) - Responsabilité Sociétale des Entreprises (RSE) : La norme ISO 26000 (ISO, 2020a) est intitulée « Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale ». Elle englobe des objectifs liés à différentes thématiques : droits de l’Homme, relations et conditions de travail, environnement, loyauté des pratiques, questions relatives aux consommateurs, communautés et développement local. Les domaines d’action liés à l’environnement sont la prévention de la pollution, l’utilisation durable des ressources, l’atténuation des changements climatiques, la protection de la biodiversité et la réhabilitation des habitats naturels. La norme ISO 26030 (ISO, 2020b) qui est intitulée « Responsabilité sociétale et développement durable – Lignes directrices pour l’utilisation de l’ISO 26000 :2010 dans la chaîne alimentaire » présente les lignes directrices de la mise en place d’une démarche RSE au sein d’une entreprise agroalimentaire. Cette norme n’est pas certifiante et c’est l’une des raisons pour lesquelles d’autres labels se sont développés. C’est notamment le cas du label « B-Corporation » qui permet aux entreprises internationales de témoigner de leurs actions menées en matière de RSE.

Famille des normes ISO 14000 - Management environnemental : Créée en 1996 puis mise à jour en 2004 et 2015, la norme ISO 14001 est une norme certifiante intitulée « Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation » (ISO, 2015). Cette norme a pour objectif de fournir un cadre aux entreprises désireuses de protéger l’environnement tout en tenant compte de leurs besoins socio-économiques. Ce cadre de management environnemental repose sur le modèle « planifier-réaliser-vérifier-agir ». Ainsi, dans un premier temps, les objectifs environnementaux seront établis ainsi que les actions à réaliser pour les atteindre (étape « planifier »). Les actions seront ensuite mises en place (étape « réaliser »). Puis, une surveillance visant à s’assurer des effets des actions menées sera mise conduite (étape « vérifier »). Enfin, des actions d’amélioration seront conduites dans une démarche d’amélioration continue (étape « agir ») (ISO, 2015). Les différentes étapes à suivre pour la réalisation d’une ACV sont d’ailleurs détaillées dans les normes 14040-14044. Ces étapes seront présentées brièvement dans la section 1.5.3.2.1. La norme ISO 14062 intitulée « Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit » répertorie quant à elle la marche à suivre dans une démarche d’écoconception. L’écoconception d’un produit consiste à prendre en compte des aspects environnementaux dès la conception de ce produit afin de réduire ses impacts environnementaux sur l’ensemble de son cycle de vie (ISO, 2003). Les principales étapes génériques d’un processus de conception

et de développement de produit sont présentées dans le tableau 1.1 ainsi que des exemples d'actions pouvant être menées à chaque étape pour permettre la prise en compte de la qualité environnementale, tels que proposés dans la norme ISO 14062 (ISO, 2003). Ces étapes constituent des étapes génériques mais peuvent varier d'une entreprise à l'autre. En particulier, tandis que les grandes entreprises ont tendance à avoir des processus de conception très formels et structurés, les petites entreprises peuvent avoir des processus de conception plus intuitifs et moins formels. De plus, les étapes sont présentées dans un certain ordre mais il est possible, à la suite d'une étape, de revenir à une étape précédente.

Tableau 1.1. Principales étapes d'un processus de conception et de développement de produit et actions visant à atteindre une certaine performance environnementale de ce produit (ISO, 2003)

Etapes	Description	Actions possibles pour intégrer la dimension environnementale
Planification	Formulation des exigences applicables au produit, étude du budget, analyse des facteurs externes (ex : attentes des clients, situation du marché, concurrents, réglementation, ...)	Formuler les exigences environnementales, réfléchir au cycle de vie, faire l'analyse environnementale d'un produit de référence, ...
Conception préliminaire	L'objectif de cette étape est de déterminer un ou plusieurs concepts possibles répondant aux exigences établies lors de l'étape de conception. Différentes méthodes peuvent être utilisées pour y parvenir (ex : brainstorming).	Réaliser des analyses orientées sur le cycle de vie, étudier l'accès aux données nécessaires, étudier les outils d'évaluation à employer pour récolter les informations nécessaires.
Conception détaillée	A cette étape, les concepts sont développés plus en détails.	Collecter des données en lien avec les aspects environnementaux (ex : interroger les fournisseurs, utilisation de bases de données), ...
Essais/prototype	Cette étape permet de confronter le concept à la réalité du terrain comme par exemple les contraintes liées à la production et aux procédés de fabrication.	Evaluation de la performance environnementale, vérification de la conformité aux exigences environnementales, prévisions d'éventuelles modifications en lien avec les résultats obtenus.
Production/Lancement	Cette étape correspond à la mise du produit sur le marché.	Communiquer des informations en lien avec les aspects environnementaux (ex : usage, mode d'élimination).
Revue du produit	La revue du produit sert, une fois le produit mis sur le marché, à s'assurer qu'il répond bien à certaines exigences (ex : attentes des clients).	Collecte d'informations pouvant servir à améliorer le produit ou à en concevoir d'autres.

Comme nous pouvons le constater dans le tableau 1.1, la norme ISO 14062 préconise la prise

en compte de la dimension environnementale le plus tôt possible dans le processus de conception de produit. La norme précise d'ailleurs que la prise en compte de la dimension environnementale peut être rendue impossible si les concepteurs s'y intéressent trop tard dans le processus de conception, en particulier une fois que les grandes décisions techniques sont prises (ISO, 2003).

Au-delà des démarches d'écoconception, les entreprises peuvent également mettre en place des démarches d'éco-innovation. L'éco-innovation est définie par la Commission européenne (2013) comme étant « toute innovation qui débouche sur des progrès importants en vue de la réalisation de l'objectif d'un développement durable, grâce à une réduction des effets de nos modes de production sur l'environnement, une amélioration de la résistance de la nature aux pressions environnementales et une utilisation plus efficace et plus responsable des ressources naturelles ». Ainsi, l'éco-innovation a une ambition plus grande que l'écoconception à la fois dans les bénéfices environnementaux visés que dans la latitude à modifier le produit alimentaire pouvant aller jusqu'à la création d'un produit alimentaire nouveau. La nouveauté peut alors porter sur l'usage d'ingrédients et/ou d'emballages non utilisés habituellement pour ce type d'aliment, ou encore sur des procédés de transformation nouveaux. De plus, pour certains auteurs, la notion d'éco-innovation englobe la volonté d'aboutir à des produits présentant un bénéfice environnemental mais également des bénéfices sur d'autres dimensions, notamment économiques et sociales (Réseau EcoSD, 2013).

L'ANIA a publié en 2015 un ouvrage dans lequel sont regroupées différentes actions menées par les entreprises dans le but de réduire les impacts environnementaux liés à leurs activités. Ces actions environnementales peuvent avoir lieu à différents niveaux de la chaîne : actions sur les approvisionnements, utilisation efficace de l'énergie, gestion des emballages et de leurs fins de vies, optimisation de la logistique et du transport, lutte contre le gaspillage alimentaire. Le tableau 1.2 présente quelques exemples de ces actions.

Tableau 1.2. Exemples d'actions environnementales conduites par des entreprises agroalimentaires (ANIA, 2015)

Action sur les approvisionnements	Programmes pilote de culture de légumes pour réduire l'utilisation de produits phytosanitaires grâce à des techniques innovantes de désherbage mécanique (Bonduelle).
Utilisation efficace de l'énergie	Utilisation d'énergie thermique renouvelable issue d'une usine d'incinération d'ordures ménagères permettant ainsi une réduction de l'utilisation des ressources fossiles (Mars).
Gestion des emballages et de leur fin de vie	Réduction de l'utilisation du plastique dans les emballages et optimisation du poids des bouchons (Yoplait)
Optimisation de la logistique	Choix du transport des marchandises par train plutôt que par camion (Roquette)
Lutte contre le gaspillage alimentaire	Développement d'un emballage « stop goutte » permettant de maîtriser le dosage et donc d'éviter le gaspillage alimentaire (Lesieur)

1.5.3. Evaluation de la qualité environnementale

Plusieurs méthodes visant à évaluer la performance environnementale d'un produit existent. Parmi elles, il est possible de distinguer les méthodes qualitatives des méthodes quantitatives.

1.5.3.1. Méthodes qualitatives

Un exemple de méthode qualitative est la checklist d'écoconception qui se compose d'une série de questions permettant de contrôler facilement la performance environnementale d'un produit qu'il soit déjà conçu ou en cours de conception. Les questions concernent les différentes étapes de cycle de vie du produit telles que la production des matières premières, les procédés utilisés, la distribution, la phase d'utilisation et la fin de vie. Initialement, cet outil a été développé dans le but de concevoir des systèmes artificiels (Brezet et Van Hemel, 1997). La checklist s'est depuis développée dans d'autres domaines, comme par exemple en conception de procédés alimentaires (Woodhouse et al., 2018) ou encore dans le secteur des emballages (Conseil National de l'Emballage, 2012). Par exemple, le conseil National de l'Emballage propose une checklist de 25 questions permettant aux entreprises d'inclure simplement la dimension environnementale à toutes les étapes du cycle de vie d'un produit emballé. Un exemple de question est « Peut-on réduire le volume du produit à emballer de façon à réduire la quantité d'emballage à valeur d'usage identique ? » (Conseil National de l'emballage, 2012). Les réponses ainsi obtenues permettent de mettre en évidence des actions d'écoconception pouvant être mises en place afin d'améliorer la performance environnementale du produit étudié. D'autres outils qualitatifs existent tels que les matrices matériaux-énergie-toxicité ou encore les listes de substances. Tous ces outils visent notamment à faciliter une réflexion sur le cycle de vie des produits et leur efficacité dépend de l'expertise des personnes qui les complètent (Yannou-Le Bris, 2019).

1.5.3.2. Méthodes quantitatives

Plusieurs méthodes d'évaluation environnementale quantitatives existent. On peut distinguer les méthodes quantitatives monocritères évaluant l'impact environnemental d'un produit selon un seul indicateur environnemental des méthodes quantitatives multicritères.

L'ACV, qui est une méthode quantitative multicritère, constitue la méthode de référence pour l'évaluation environnementale des produits alimentaires. L'ACV permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit, d'un procédé et même d'un service. Dans ce manuscrit, nous utiliserons l'ACV pour l'évaluation de produits. Cette méthode présente l'avantage d'être actuellement l'unique méthode d'évaluation des impacts environnementaux à bénéficier d'une normalisation internationale (normes ISO 14040 à 14044 (ISO, 2006a)). De plus, elle est la méthode préconisée par la Commission européenne pour l'évaluation environnementale des produits (Union européenne, 2021) et est préconisée par la norme ISO 14062 pour

l'écoconception de produits (ISO, 2003). L'ACV est définie dans la norme ISO 14044 comme étant la « compilation et évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie » (ISO, 2006a).

1.5.3.2.1. Les 4 grandes étapes de l'ACV

La réalisation d'une ACV se fait selon 4 étapes principales présentées en Figure 1.3.

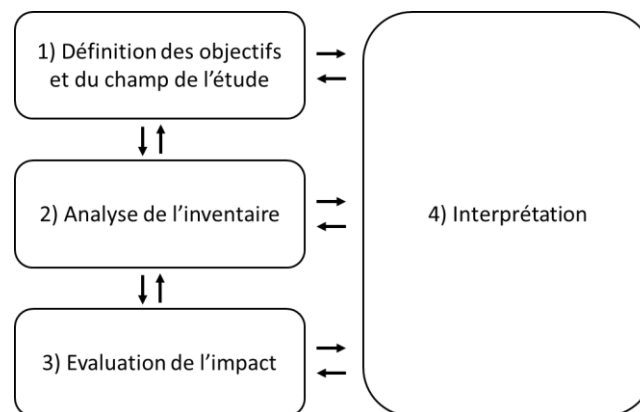


Figure 1.3. Principales étapes de l'ACV (ISO, 2006b)

1.5.3.2.1.1. Etape 1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

La première étape de l'ACV est de définir :

- Les objectifs : par exemple comparer les performances environnementales de deux produits ou identifier des actions d'écoconception ;
- Etablir la cible de l'étude : par exemple usage interne pour l'écoconception ou communication vers les consommateurs.

Le périmètre de l'étude doit être défini durant cette étape. Il peut prendre en compte le cycle de vie entier du produit ou seulement une partie, en fonction de l'objectif de l'étude. La figure 1.4 présente un schéma de cycle de vie d'un produit.

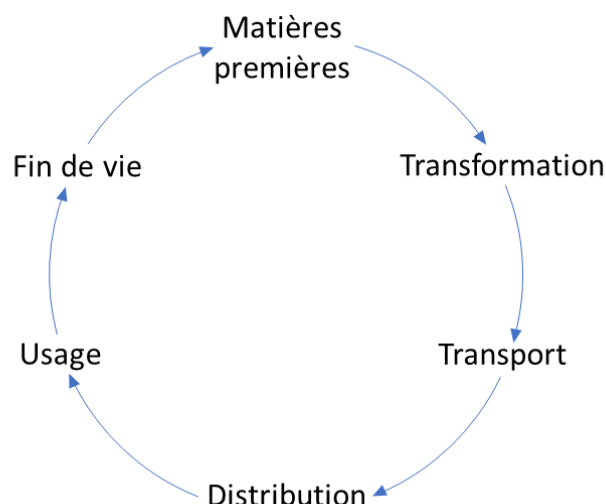


Figure 1.4. Schéma du cycle de vie d'un produit pris en compte en ACV

Cette approche cycle de vie permet d'éviter le transfert d'impacts environnementaux d'une étape du cycle de vie à une autre. Elle permet de s'assurer par exemple qu'une action menée afin de réduire les impacts environnementaux liés à la transformation du produit n'entraîne pas une augmentation des impacts à une autre étape.

L'ACViste (ou le groupe de travail) doit ensuite définir une unité fonctionnelle, définie comme la « performance quantifiée d'un système de produits destinée à être utilisée comme unité de référence dans une analyse du cycle de vie » par la norme ISO 14044 (ISO, 2006a). Malheureusement, la fonction d'un produit est parfois difficile à définir et c'est notamment le cas pour les produits alimentaires. En effet, la plupart des ACV réalisées jusqu'à présent sur des produits alimentaires reposent sur des unités fonctionnelles massiques ou volumiques. Ce type d'UF est d'ailleurs recommandé par certains guides de bonnes pratiques en lien avec l'ACV tel que le celui du PEF (Zampori et Pant, 2019). Néanmoins, la réduction de la fonction d'un produit alimentaire à sa masse ou à son volume pose question. En effet, une UF massique tend à avantager les produits les plus lourds et non les produits de meilleure qualité. Dans une démarche d'écoconception, le concepteur, s'il souhaite obtenir une bonne performance environnementale de ces produits a donc tout intérêt à les alourdir, ce qui peut conduire à des pratiques discutables ainsi qu'à des produits de moins bonnes qualité nutritionnelle par exemple.

L'apport d'énergie et de nutriments nécessaires à la vie d'un individu est la fonction primaire d'un aliment (Burgess et Glasauer, 2004). Différentes approches faisant intervenir des UF plus représentatives de la fonction d'un aliment seront présentées dans la section 1.6.2. Une fois l'UF définie, l'ACViste doit en déduire le flux de référence défini comme étant la « mesure des sortants des processus, dans un système de produits donné, nécessaire pour remplir la fonction telle qu'elle est exprimée par l'unité fonctionnelle » (ISO, 2006a). Ainsi, avec une UF de 1kg de produit, le flux de référence sera également 1kg de produit mais il peut varier selon les UF choisies. Par exemple, pour une UF de 10g de protéines, le flux de référence sera égal à une masse de produit contenant un total de 10g de protéines.

1.5.3.2.1.2. Etape 2. Analyse de l'inventaire de cycle de vie

Lors de cette étape, l'ensemble des flux entrants et sortants de chacune des étapes du cycle de vie du produit est listé et quantifié. La consommation de matières premières, d'énergie, d'eau ainsi que les émissions de déchets et de polluants sont des exemples de flux pouvant être pris en compte lors de la réalisation d'une ACV. Cette étape est en général la plus chronophage car elle nécessite la collecte de nombreuses données, parfois difficilement accessibles. Les données utilisées en ACV peuvent être obtenues de différentes manières : mesure, calcul ou estimation (ISO, 2006b). De plus, on peut différencier les données primaires des données secondaires et les données d'avant-plan des données d'arrière-plan.

Données primaires vs données secondaires : Les données primaires sont des données spécifiques à un cas particulier ayant nécessité de recueillir des données ou encore de conduire des analyses (par exemple pour connaître la composition d'une émission gazeuse ou l'énergie consommée par le fonctionnement d'une installation). Les données secondaires sont plus génériques et peuvent par exemple provenir de bases de données nationales, de consultants ou de groupes de recherche (ILCD, 2010).

Données d'avant plan vs données d'arrière-plan : Il est possible de distinguer les systèmes d'avant plan des systèmes d'arrière-plan. Les données d'un système d'avant plan désignent l'ensemble des données qui permettent de décrire les processus qui sont requis pour l'exécution du cycle de vie comme par exemple les ingrédients, les procédés de transformation d'un lieu donné de production d'aliments ou encore un transport. Les données d'arrière-plan permettent, elles, de décrire les processus mobilisés pour alimenter les données de premier plan. Par exemple, les natures et quantités de flux requis pour produire 1KW. Ces données d'arrière-plan peuvent être primaires (donc recueillies sur site) mais, le cas ordinaire est d'utiliser des données secondaires issues de bases de données. Par exemple, si l'ACV est réalisée du point de vue d'un producteur, le système d'avant plan inclut les procédés de son lieu de production tandis que le système d'arrière-plan peut inclure par exemple la production d'électricité. Les données relatives aux systèmes d'avant-plan sont les données d'avant-plan tandis que les données relatives aux systèmes d'arrière-plan sont les données d'arrière-plan (ILCD, 2010).

Il existe de nombreuses bases de données d'inventaires de cycles de vie (ICV) dédiées à la réalisation d'ACV. Elles se distinguent les unes des autres de différentes manières. Elles peuvent ainsi être spécifiques de différentes régions du monde. Également, il est possible de distinguer les bases de données payantes des bases de données gratuites. Dans le travail présenté dans ce manuscrit, les deux principales bases de données utilisées sont Ecoinvent et AGRIBALYSE. La base de données Ecoinvent est une base de données internationale et payante développée par Ecoinvent en Suisse. Elle contient des données d'inventaires pouvant être spécifiques à un pays en particulier (par exemple la France), à une région du monde (par exemple l'Europe) ainsi que des données plus globales. La base de données Ecoinvent est assez complète dans son contenu puisqu'elle regroupe des données relatives à de nombreux secteurs économiques (électricité, transport, matériaux, agriculture...) mais est relativement pauvre en données de

produits alimentaires. La base de données AGRIBALYSE est quant à elle une base de données française, publique et gratuite. Elle est spécifique aux productions agricoles et aux produits alimentaires français. Elle contient actuellement environ 2 500 aliments disponibles en France, et est mise en correspondance avec la base de données de compositions nutritionnelle CIQUAL. Ces bases de données d'ICV sont régulièrement mises à jour, ce qui leur permet de prendre en compte les avancées dans le domaine de l'ACV au cours du temps, les rendant ainsi de plus en plus robustes, complètes et précises au cours du temps.

1.5.3.2.1.3. Etape 3. Evaluation des impacts

L'évaluation des impacts environnementaux consiste à convertir les flux déterminés à l'étape précédente en impacts environnementaux grâce à une méthode de caractérisation. L'ACV est une méthode multicritère, ce qui signifie que les impacts environnementaux sont évalués selon différents indicateurs environnementaux. Les indicateurs peuvent être différents selon la méthode de caractérisation utilisée mais deux grands types d'indicateurs environnementaux peuvent être distingués : les indicateurs midpoint et les indicateurs endpoint. Les indicateurs midpoint quantifient les effets des substances émises ou consommées au milieu de la chaîne de causalité (Jolliet et al., 2005). La destruction de la couche d'ozone et l'eutrophisation sont des exemples d'indicateurs midpoint. Les indicateurs endpoint évaluent, quant à eux, l'impact potentiel d'une substance à la fin de la chaîne de causalité. La mortalité des poissons ou une perte de biodiversité sont des exemples d'indicateurs endpoint (Jolliet et al., 2005).

Certaines méthodes de caractérisation calculent des indicateurs midpoint, d'autres des indicateurs endpoint. L'avantage des indicateurs midpoint est que leur calcul repose sur moins d'incertitudes et qu'ils sont donc plus précis. En effet, les méthodes de calculs qui sont employées pour les mesurer sont basées sur des connaissances explicites ce qui n'est pas le cas des endpoint. De plus, ils sont plus nombreux que les indicateurs endpoint, ce qui permet une compréhension plus complète des impacts environnementaux du système étudié. Les indicateurs endpoint sont, quant à eux, moins précis car ils se situent plus loin dans la chaîne de causalité et sont, de ce fait, plus difficiles à prédire que les indicateurs midpoint. Néanmoins, les indicateurs endpoint permettent de communiquer plus facilement et présentent donc également un intérêt non négligeable. En effet, leur plus faible nombre ainsi que le fait qu'ils soient basés sur des impacts de fin de chaîne de causalité les rend plus compréhensibles par le grand public. Le fait que les différentes méthodes de caractérisation aboutissent à des indicateurs environnementaux parfois différents rend difficile les comparaisons des produits issus d'études mobilisant des méthodes de caractérisation différentes. Pour pallier cette difficulté, des travaux européens actuels visent à harmoniser les pratiques méthodologiques. Ainsi, la méthode de caractérisation actuellement préconisée par la commission européenne est la méthode PEF permettant de calculer seize indicateurs midpoint (Zampori et Pant, 2019).

Bien que l'ACV soit une méthode multicritère, certaines approches reposant sur une méthodologie cycle de vie se focalisent sur un critère unique, c'est le cas par exemple de

l'empreinte carbone (Ramachandra et Mahapatra, 2015). Une telle méthode permet d'aboutir à un résultat plus simple et plus facile à analyser. Néanmoins, le fait d'utiliser une méthode multicritère permet d'éviter le transfert d'impact d'un indicateur environnemental à un autre, ce qui est impossible avec un outil monocritère. En effet, lorsqu'un seul indicateur est utilisé, il est possible de conclure qu'une action permet d'améliorer la performance environnementale d'un produit, alors qu'elle entraîne potentiellement une diminution de sa performance sur d'autres indicateurs non étudiés.

1.5.3.2.1.4. Etape 4. Interprétation

La phase d'interprétation s'articule autour de trois axes principaux (ISO 2006a) :

- Identifier les enjeux significatifs sur la base de l'analyse des résultats d'inventaire de cycle de vie (ICV) et sur l'évaluation des impacts ;
- Conduire des vérifications incluant notamment des contrôles de complétude, de significativité et de cohérence ;
- Tirer des conclusions, formuler des recommandations et expliquer les limitations. En particulier, l'interprétation doit refléter le fait que les résultats d'ACV sont relatifs et qu'ils indiquent des effets potentiels et non réels.

Ainsi, la phase d'interprétation ne se limite pas à la fin de l'ACV mais doit être réalisée en parallèle des différentes étapes, comme on peut le voir sur la figure 1.3.

1.5.3.3. Indicateurs de qualité

1.5.3.3.1. Les seize indicateurs recommandés par la commission européenne

Comme évoqué précédemment, il existe de nombreux indicateurs pouvant être utilisés pour évaluer la qualité environnementale des produits alimentaires. Ils peuvent varier selon la méthode de caractérisation employée pour réaliser l'ACV. Parmi les différents indicateurs disponibles, seize indicateurs midpoint sont recommandés par la Commission Européenne afin d'étudier l'Empreinte Environnementale d'un Produit (Product Environmental Footprint, PEF) (Zampori et Pant, 2019). Ces seize indicateurs sont présentés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3. Présentation des 16 indicateurs EF (Environmental Footprint) (Informations recueillies dans Sala et al., 2019)

Indicateur	Unité	Description
Changement climatique	kg CO2eq	Correspond à l'augmentation de la température moyenne globale résultant des émissions de gaz à effet de serre.
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC11eq	La couche d'ozone joue un rôle protecteur contre les UV solaires. L'appauvrissement de la couche d'ozone a des effets néfastes sur la santé des êtres vivants (ex : augmentation de la prévalence des cancers de la peau)
Radiations ionisantes	kBq U-235 eq	Correspond aux effets de la radioactivité sur la santé. Des radiations ionisantes peuvent en particulier être générées par la production d'électricité nucléaire, via les déchets radioactifs qui en résultent (AGRIBALYSE, 2021).
Formation photochimique d'ozone	kg NMVOC eq	Correspond à la formation d'ozone de faible altitude. Cet ozone est nocif pour la santé des êtres vivants. Il augmente par exemple la prévalence de maladies respiratoires chez les humains.
Particules fines	disease incidence	Correspond aux impacts néfastes que les particules fines et leurs précurseurs (Nox, SO2) peuvent avoir sur la santé humaine.
Toxicité humaine non-cancérogène	CTUh	Correspond aux effets potentiels que peuvent avoir certaines substances néfastes (générées par le système étudié) sur la santé humaine.
Toxicité humaine cancérogène	CTUh	Correspond aux effets potentiels que peuvent avoir certaines substances néfastes (générées par le système étudié) sur la santé humaine.
Acidification	mol H+ eq	Correspond aux émissions dans l'atmosphère se déposant dans les éco-systèmes (par exemple par l'intermédiaire de pluies acides). Les émissions peuvent avoir des origines variées (ex : transport, production électrique, ...) et sont néfastes aux écosystèmes (ex : déclin de forêt ou encore mortalité des poissons).
Ecotoxicité d'eau douce	CTUe	Correspond aux potentiels impacts toxiques de certaines substances capables de s'accumuler dans les organismes vivants et pouvant ainsi impacter certaines espèces mais aussi l'ensemble de l'écosystème.
Eutrophisation - Eaux douces	kg P eq	L'eutrophisation correspond à un enrichissement excessif d'un milieu en certaines substances (contenant de l'azote ou du phosphore). Ceci peut entraîner la prolifération de certaines espèces aboutissant à une perte d'oxygène disponible pour d'autres espèces. Les phénomènes d'eutrophisation sont notamment liés à l'emploi d'engrais en agriculture.
Eutrophisation - Marine	kg N eq	L'eutrophisation marine suit les mêmes mécanismes que l'eutrophisation des eaux douces mais est spécifique aux milieux marins.
Eutrophisation - Terrestre	mol N eq	L'eutrophisation terrestre suit les même mécanismes que l'eutrophisation des eaux douces mais est spécifique aux milieux terrestres.
Usage des terres	Pt	Correspond à l'exploitation de terres. L'exploitation de ces terres peut être variée (agriculture, construction de route, ...).
Usage des ressources en eau	m3 depriv.	Correspond à l'épuisement des ressources en eau. Il est à noter que la consommation d'une certaine quantité d'eau aura un poids environnemental plus fort dans les régions où l'eau est la plus rare.
Usage des ressources énergétiques	MJ	Correspond à l'épuisement des ressources non renouvelables dans un but de production d'énergie (ex : pétrole, gaz).
Usage des ressources minérales	kg Sb eq	Correspond à l'épuisement des ressources non renouvelables d'origine minérale (ex : métaux).

Comme le montre le tableau 1.3, les 16 indicateurs sont variés et permettent de refléter différentes facettes de la performance environnementale d'un produit. Par exemple, les indicateurs d'eutrophisation sont particulièrement liés à l'amont agricole tandis que l'indicateur radiations ionisantes est plus sensible à la consommation électrique. Ceci montre l'intérêt d'avoir une vision multicritère des impacts environnementaux d'un produit afin d'obtenir une interprétation plus globale de sa performance environnementale. Néanmoins, les indicateurs ne sont pas tous équivalents. En effet, certains sont considérés comme plus importants que d'autres du fait de l'impact environnemental qu'ils reflètent. Également, certains indicateurs sont considérés comme plus fiables que d'autres car les méthodes utilisées pour les évaluer sont plus robustes. L'indicateur considéré comme étant actuellement le plus important et le plus robuste est l'indicateur de changement climatique (Sala et al., 2019). C'est notamment pour cette raison qu'il s'agit de l'indicateur environnemental le plus mobilisé dans les études dédiées aux impacts environnementaux des régimes alimentaires (Ridoutt et al., 2017). À l'inverse, certains indicateurs sont considérés comme étant très peu robustes et sont donc globalement moins étudiés. Les trois indicateurs considérés comme étant les moins robustes à l'heure actuelle sont les trois indicateurs de toxicité (écotoxicité, toxicité humaine non cancérogène, toxicité humaine cancérogène) (Sala et al., 2019). De plus, les 16 indicateurs ne permettent pas de refléter l'ensemble des impacts environnementaux, ce qui est une limite importante de l'ACV. Un des enjeux environnementaux étant souvent mis en avant comme n'étant pas assez bien représenté par les indicateurs ACV est la biodiversité. En effet, bien que certains indicateurs ACV (tels que l'acidification et l'eutrophisation) reflètent des impacts ayant des effets sur la biodiversité (par exemple l'eutrophisation marine peut entraîner un déséquilibre entre les espèces du milieu), plusieurs aspects de la biodiversité ne sont pas couverts. C'est le cas par exemple du risque d'extinction d'espèces ou encore la diversité générique au sein d'un milieu donné (Danic et al., 2014). Il est donc nécessaire d'interpréter les résultats d'ACV avec précaution, en gardant en tête qu'ils ne reflètent pas forcément bien certains aspects pourtant importants, tels que la biodiversité. Ainsi, une ACV peut théoriquement valoriser des systèmes de production ayant des impacts très négatifs sur la biodiversité. Néanmoins, des travaux sont menés pour tenter de pallier ces limites (Myllyviita et al., 2019).

1.5.3.3.2. Les scores agrégés

L'utilisation de plusieurs indicateurs environnementaux peut conduire à des difficultés d'interprétation dans le cas où les valeurs des indicateurs sont contradictoires (notamment en cas de comparaison de solutions). De ce fait, des scores agrégés, plus simples notamment pour communiquer sur la qualité environnementale ont été développés.

1.5.3.3.2.1. Le Single Score

Le Single Score EF3 constitue un score agrégeant les 16 indicateurs calculés par la méthode

PEF. Chacun des indicateurs inclus est pondéré par un facteur de pondération reflétant d'une part la robustesse relative de l'indicateur et d'autre part ses enjeux environnementaux. Le tableau 1.4 présente les facteurs de pondération finaux pour chaque indicateurs.

Tableau 1.4. Facteurs de pondérations utilisés pour le calcul du Single Score EF3 (adapté de Sala et al., 2018)

Indicateur	Facteur de pondération
Changement climatique	21.06
Appauvrissement de la couche d'ozone	6.31
Radiations ionisantes	5.01
Formation photochimique d'ozone	4.78
Particules fines	8.96
Toxicité humaine non-cancérigène	2.13
Toxicité humaine cancérogène	1.84
Acidification	6.20
Ecotoxicité d'eau douce	1.92
Eutrophisation - Eaux douces	2.80
Eutrophisation - Marine	2.96
Eutrophisation - Terrestre	3.71
Usage des terres	7.94
Usage des ressources en eau	8.51
Usage des ressources énergétiques	8.32
Usage des ressources minérales	7.55

L'indicateur ayant la pondération la plus importante est l'indicateur de changement climatique, ce qui s'explique par le fait que, comme cela avait précédemment été mentionné dans la section 1.5.3.3.1., cet indicateur est considéré comme l'indicateur le plus robuste et le plus important des indicateurs ACV (Sala et al., 2018). Sa pondération est plus de deux fois supérieures à toutes les autres pondérations, ce qui implique que le single score est principalement influencé par cet indicateur, et que les autres indicateurs y sont au contraire peu représentés.

1.5.3.3.2. Scores environnementaux en vue d'un affichage environnemental

Bien que l'affichage environnemental ne soit pas encore en place, les travaux menés ces deux dernières années ont permis aux personnes impliquées de s'accorder sur un certain nombre de lignes directrices et notamment sur le choix de la méthode d'évaluation des impacts. Le rapport du conseil scientifique conclut ainsi que l'affichage environnemental devrait viser deux objectifs. Le premier est de mettre en évidence les différences d'impacts environnementaux entre différentes catégories de produits alimentaires, offrant ainsi la possibilité aux consommateurs de faire évoluer leurs régimes alimentaires vers plus de respect de l'environnement. Le second est de mettre en évidence les différences d'impacts environnementaux au sein d'une même catégorie, permettant ainsi au consommateur d'identifier les produits les plus durables au sein d'une catégorie. Une telle situation encouragerait également les professionnels du secteur à écoconcevoir leurs produits (Soler et al., 2021). Il a été établi que l'affichage environnemental sera basé sur des résultats d'ACV conduites en respectant le cadre de référence PEF. Le rapport souligne néanmoins que l'ACV présente des limites et envisage des axes d'amélioration pouvant être implémentés au cours du temps. Les améliorations évoquées concernent notamment une meilleure prise en compte de l'impact des pratiques de production sur le stockage du carbone dans les sols ou encore la biodiversité à la parcelle.

Concernant les données à utiliser, la réalisation d'ACV spécifiques de l'ensemble des produits alimentaires permettrait de mieux discriminer les produits intra-catégorie mais nécessiterait de nombreuses données ce qui aurait un coût important. A l'inverse, utiliser des données plus génériques (telles que celles de la base de données AGRIBALYSE) limite ce coût mais présente également des limites. En particulier, cette option ne permet pas de rendre compte de la variabilité des impacts environnementaux intra-catégorie. De plus, une telle pratique rend difficile la mise en relief des efforts spécifiques conduits par certaines entreprises. Ainsi, il est souhaitable d'utiliser un compromis entre des données 100% spécifiques et des données génériques de la base AGRIBALYSE.

Il a également été conclu que l'affichage devait être synthétique et coloriel pour exercer un effet significatif sur les choix des consommateurs. Une échelle en 5 niveaux, basée sur un score environnemental synthétique a ainsi été préconisée.

Actuellement, plusieurs affichages environnementaux des produits alimentaires co-existent. Parmi les plus connus, on peut citer l' « Eco-score » et le « Planet Score ». Le calcul de l'Eco-score repose sur les indicateurs ACV traduits sous forme d'un score sur 100 points. Un système de bonus/malus permet ensuite de prendre en compte plusieurs indicateurs complémentaires (labels, emballages, ...). La note finalement obtenue est ensuite traduite sous la forme de lettres : A correspondant à la meilleure qualité environnementale et E à la moins bonne (ADEME, 2022). Le Planet score repose sur des données ACV de la base AGRIBALYSE, qu'il enrichit grâce à des indicateurs liés à la biodiversité ou encore aux pesticides. Contrairement à l'Ecoscore, le Planet score n'utilise pas de système de bonus/malus et ne présente pas une note unique mais plutôt une note principale accompagnée de 4 sous-notes (pesticides, biodiversité, climat et mode d'élevage) (Planet score, 2021). Le fait que plusieurs systèmes d'affichage des impacts environnementaux coexistent peut apporter de la confusion chez le consommateur, d'autant plus que les notes attribuées sont parfois contradictoires d'un score à l'autre. Cette situation témoigne de la nécessité d'uniformiser l'affichage environnemental. Elle met également en relief toute la complexité de résumer la qualité environnementale d'un produit en un seul. La mise en place de l'affichage environnemental officiel des produits alimentaires est prévue pour 2023 (Gouvernement français, 2022).

1.5.4. Conclusions sur la qualité environnementale

Des quatre dimensions de qualité explorées dans ce chapitre, la qualité environnementale est celle étant apparue le plus récemment. Malgré cela et du fait de l'urgence environnementale, plusieurs réglementations visant à réduire les impacts environnementaux liés à l'alimentation sont actuellement en place. Il existe plusieurs méthodologies permettant de calculer les impacts environnementaux d'un produit, la plus reconnue étant actuellement l'analyse de cycle de vie. Cette dernière engendre plusieurs indicateurs quantitatifs pouvant éventuellement être regroupés en un score unique. Néanmoins, le projet d'affichage environnemental des produits alimentaires fait émerger des méthodes permettant de traduire la performance environnementale en indicateurs plus qualitatifs, plus faciles à appréhender pour les consommateurs, mais potentiellement moins transparents.

1.6. COUPLAGE ENTRE LA QUALITE ENVIRONNEMENTALE ET D'AUTRES DIMENSIONS DE QUALITE DES ALIMENTS

Les paragraphes précédents ont permis de mettre en évidence que les dimensions de la qualité des produits alimentaires présentées étaient de natures variées, notamment de par la manière dont elles sont évaluées et prises en compte par les entreprises agroalimentaires. Ces différences peuvent rendre complexe leur prise en compte commune lors d'un processus de conception de produit alimentaire. Nous allons désormais explorer les méthodes disponibles dans la littérature permettant d'étudier conjointement la qualité environnementale et d'autres dimensions de qualité. De nombreux auteurs se sont intéressés à coupler la qualité

environnementale avec une ou plusieurs autres dimensions de qualité, à différentes échelles (aliment, plat, régime alimentaire). On considère ici comme étant un couplage toute méthode permettant d'étudier simultanément la performance du produit selon sa dimension environnementale et une ou plusieurs autres dimensions. La dimension la plus souvent couplée à la dimension environnementale est la qualité nutritionnelle. En effet, comme en témoigne un récent rapport de la FAO, le nombre d'études publiées évaluant conjointement les aspects environnementaux et nutritionnels/santé d'aliments ou de régimes alimentaires est passé de 56 par an en 2000 à 693 par an en 2020 (McLaren et al., 2021). Ces études peuvent utiliser des moyens variés dont les principaux sont :

- Etudier les corrélations entre qualité nutritionnelle et environnementale ;
- Réaliser des ACV de produits alimentaires en utilisant une UF nutritionnelle, plus représentative de la qualité nutritionnelle d'un produit que sa masse ;
- Utiliser un score synthétique prenant en compte qualité nutritionnelle et qualité environnementale.

Dans cette partie, nous présenterons des exemples d'études utilisant des couplages afin de coupler la qualité environnementale à la qualité nutritionnelle ou à la qualité sensorielle (bien que ce type de couplage soit bien plus rare). Des méthodes présentant un intérêt potentiel pour le couplage entre la dimension environnementale et les dimensions nutritionnelle et/ou sensorielle seront également présentées, bien que les exemples disponibles ne se concentrent pas sur ces dimensions.

1.6.1. Etude des relations entre la qualité environnementale et la qualité nutritionnelle ou sensorielle

Une approche fréquemment employée pour étudier conjointement deux dimensions consiste à étudier les relations de corrélation entre ces deux dimensions. Dans la littérature, cela a été fait à différentes échelles : régime alimentaire, produit alimentaire, et repas.

1.6.1.1. A l'échelle du régime alimentaire

Plusieurs études sont arrivées à la conclusion qu'il existait une corrélation positive entre la qualité nutritionnelle d'un régime alimentaire et sa qualité environnementale. Par exemple, Monsivais et al. (2015) ont mis en évidence que plus un régime alimentaire se rapprochait des recommandations visant à prévenir ou contrôler les problèmes d'hypertension et moins ce régime engendrait des émissions de gaz à effets de serre par rapport à un régime classique. De même, Hendrie et al. (2016) ont conclu à une corrélation positive entre la teneur énergétique des régimes alimentaires des australiens et les émissions de gaz à effet de serre de ces régimes. Ainsi, les messages publics visant à promouvoir une alimentation de bonne qualité nutritionnelle et adaptée aux besoins énergétiques de chacun pourrait contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre liés à l'alimentation des australiens.

Cependant, certaines études portant sur ce sujet ont obtenu des résultats différents. Par exemple, Vieux et al. (2013) ont mis en évidence que pour des adultes français, les régimes à haute qualité nutritionnelle étaient corrélés à des émissions significativement plus élevées de gaz à effet de serre (9% pour les hommes et 22% pour les femmes) que les régimes alimentaires de faible qualité nutritionnelle. Ces différences de résultats pourraient s'expliquer par le fait que les méthodes utilisées pour définir la qualité nutritionnelle d'un régime ne sont pas les mêmes selon les études. Également, ces études ont été menées dans des pays différents pour lesquels les régimes mais également les recommandations nutritionnelles peuvent être différents.

1.6.1.2. A l'échelle du repas

En plus du régime alimentaire et de l'aliment, l'échelle du repas a également été étudiée bien que cela soit bien moins fréquent. Cooreman-Algoed et al. (2020) ont classé 100 repas d'une cantine belge en fonction de leurs qualités environnementale (single score ReciPe) et nutritionnelle (Weighted Nutrient Density Score). Il a ainsi été montré que les repas végétariens faisaient partie des repas ayant le meilleur score environnemental mais également le pire score nutritionnel, montrant que dans ce cas, qualités environnementale et nutritionnelle ne sont pas corrélées positivement. Les résultats ont également montré que les plats contenant du poisson étaient globalement les plats constituant le meilleur compromis et les plats contenant de la viande de ruminants les moins bons. Visschers et Siegrist (2015) ont quant à eux analysé en parallèle le potentiel de réchauffement climatique de repas servis au restaurant et l'évaluation par les clients du goût de leur plat en fin de repas. Ils ont conclu qu'il n'existait pas de corrélation entre le degré d'appréciation des plats par les clients et leur potentiel de réchauffement climatique. Ces résultats laissent à penser qu'à l'échelle du repas, il ne semble pas exister de corrélation positive entre qualité environnementale et qualité nutritionnelle ou sensorielle.

1.6.1.3. A l'échelle du produit alimentaire

Plusieurs études se sont intéressées au lien entre qualité nutritionnelle et qualité environnementale à l'échelle du produit alimentaire. Par exemple, Van Dooren et al. (2017) ont montré que les émissions de gaz à effet de serre sont inversement corrélées à la densité nutritionnelle (NRF9.3) des produits alimentaires pour les 403 produits alimentaires les plus consommés aux Pays-Bas. Masset et al. (2015) ont quant à eux montré que les émissions de gaz à effet de serre des produits (calculées pour 100g de produit) étaient inversement corrélées à leur score SAIN/LIM sur un échantillon de 363 produits alimentaires représentatifs du régime alimentaire français. En d'autres termes, les produits alimentaires émettant le plus de gaz à effet de serre ont tendance à avoir une qualité nutritionnelle inférieure aux autres. Néanmoins, Masset et al. (2015) ont montré que cela n'était plus le cas lorsque les émissions de gaz à effet de serre étaient calculées pour 100kcal et non pour 100g. En effet, lorsque l'UF choisie est de

100 kcal, les produits identifiés comme étant ceux engendrant le moins d'émissions de gaz à effet de serre n'étaient pas de bonne qualité nutritionnelle. Similairement, Drewnowski et al. (2015) ont mis en évidence qu'en général, plus la densité nutritionnelle (basée sur 6 ou 15 nutriments) d'un aliment était élevée et plus les émissions de gaz à effet de serre (calculées pour 100kcal) étaient importantes, sur la base de 483 produits alimentaires et boissons. On peut donc dire que les conclusions relatives à de possibles corrélations entre les émissions de gaz à effet de serre et la qualité nutritionnelle des produits semblent très dépendantes de l'UF choisie. Les principales UF nutritionnelles utilisées pour évaluer les performances environnementales des produits alimentaires ainsi que leur influence sur les résultats seront présentées dans la section suivante (1.6.2.).

On peut constater que les études identifiées à l'échelle du produit alimentaire comparent des produits issus de catégories différentes. Or, il serait intéressant d'étudier également les liens de corrélations entre la dimension nutritionnelle et environnementale à l'échelle d'une catégorie de produit.

1.6.2. Réalisation d'ACV basées sur une UF nutritionnelle, plus représentative de la qualité du produit que sa masse

Comme discuté dans la section 1.5., l'unité fonctionnelle la plus fréquemment utilisée pour l'évaluation des impacts environnementaux des produits alimentaires est la masse (ou le volume). Or, cette unité fonctionnelle présente plusieurs limites dans le cas des produits alimentaires. On peut notamment citer le fait qu'une UF massique ne représente en rien la performance d'un produit alimentaire et qu'elle peut donc pénaliser des produits de bonne qualité (notamment nutritionnelle) au profit de produits de qualité médiocre. De plus, l'usage d'une UF massique tend à favoriser les systèmes de productions intensifs. C'est notamment pour répondre à ces limites que certains auteurs se sont intéressés à des unités fonctionnelles non massiques pour l'étude des impacts environnementaux des produits alimentaires. Dans cette partie, nous nous intéresserons uniquement aux UF nutritionnelles, aucune étude incluant une UF sensorielle n'ayant été identifiée. Différents types d'UF nutritionnelles sont présents dans la littérature. Les paragraphes suivants présenteront les UF nutritionnelles les plus fréquemment utilisées.

1.6.2.1. Les UF nutritionnelles les plus fréquemment employées

1.6.2.1.1. UF basée sur la teneur énergétique

L'UF basée sur la teneur énergétique est l'une des UF nutritionnelles les plus utilisées. C'est également une UF facile à mettre en œuvre car les teneurs énergétiques des produits alimentaires sont bien documentées. Néanmoins, cette UF repose sur le principe que la fonction primaire d'un aliment est de fournir de l'énergie au corps humain. Une telle définition de la fonction d'un aliment induit que plus un aliment est riche en kilocalories et meilleure est

la qualité de cet aliment, ce qui peut être discutable, notamment dans les pays occidentaux. Pour autant, ce type d'UF pourrait être intéressant pour l'ACV de produits alimentaires dans des pays touchés par le manque de nourriture et où l'apport calorique est important. Un autre avantage à utiliser une UF basée sur la teneur énergétique d'un produit est que c'est un bon moyen de représenter la portion de produit consommée. En effet, la densité énergétique d'un aliment est corrélée aux portions habituellement consommées par un individu (Darmon, 2021). Ainsi, les aliments les plus riches en énergie ont tendance à être consommés en plus petites quantités à l'échelle du régime alimentaire que les produits à plus faible densité énergétique. Quoiqu'il en soit, comme cela a été mis en évidence par les études de Masset et al. (2015) et de Drewnowski et al. (2015) présentées dans le paragraphe 1.6.1.3., l'utilisation d'une UF basée sur la densité énergétique du produit peut fortement modifier les conclusions établies avec une UF massique.

1.6.2.1.2. UF basée sur la teneur en un nutriment

En plus de la teneur en énergie, les teneurs des produits alimentaires en nutriments ont également servi d'UF. Le nutriment étant le plus souvent utilisé en tant qu'UF est la protéine (Grigoriadis et al., 2021), principalement pour comparer les impacts environnementaux de différents aliments protéiques. Par exemple, Teixeira et al. (2013) ont comparé les impacts environnementaux de différents pâtés en utilisant plusieurs UF dont une massique et une basée sur la teneur en protéines. Il a ainsi été montré que les conclusions obtenues n'étaient pas les mêmes selon l'UF choisie et que l'UF basée sur les protéines favorisait les pâtés les plus riches en protéines. Ces pâtés apparaissaient alors comme ayant une empreinte carbone inférieure aux autres pâtés, ce qui n'était pas le cas avec l'UF massique.

Bien que la protéine soit le nutriment le plus souvent utilisé en tant qu'UF à travers la littérature, d'autres nutriments ont également été utilisés. Par exemple, Saarinen et al. (2017) ont utilisé des UF basées sur les teneurs en acides gras polyinsaturés, acides gras monoinsaturés cis, fer, calcium, folates, vitamine B2, sélénium, zinc, vitamine B12 afin d'étudier les émissions de gaz à effet de serre de différents produits alimentaires riches en protéines (d'origines animales et végétales). Cette étude a mis en évidence que les classements des émissions de gaz à effet de serre des aliments varient en fonction de l'UF utilisée, bien que des tendances se maintiennent pour l'ensemble des UF étudiées. Par exemple, le bœuf sauté fait partie des produits générant le plus de gaz à effet de serre pour l'ensemble des UF étudiées bien que son classement exact puisse évoluer selon l'UF. De même, Salazar et al. (2019) ont montré que l'utilisation d'une UF basée sur les acides gras oméga 3 pour comparer des saumons et des œufs enrichis en oméga 3 a modifié les conclusions obtenues avec une UF massique. En effet, en utilisant une UF massique, le saumon a plus d'impacts que les œufs sur les indicateurs environnementaux acidification, eutrophisation et changement climatique tandis que c'est l'inverse lorsque l'UF basée sur les acides gras oméga 3 est utilisée. Xu et al. (2018) ont quant à eux étudié l'influence de différentes UF nutritionnelles basées sur des nutriments tels que les protéines et les glucides sur le classement des empreintes carbone de 19 produits alimentaires riches en glucides

(pommes de terre, produits céréaliers, ...). De même que pour les produits riches en protéines, il a ainsi été montré que les résultats obtenus étaient très dépendants de l'UF choisie.

Baser l'UF sur la teneur de l'aliment en un composé unique est une solution assez simple pour intégrer une dimension nutritionnelle dans les ACV de produits alimentaires. Elle présente néanmoins des limites. En effet, le fait de baser une UF sur un seul nutriment implique que les teneurs en d'autres nutriments sont totalement négligées. Les produits riches en ce nutriment seront alors favorisés au détriment des autres, ce qui peut rendre les comparaisons difficiles, notamment entre des produits ayant des profils nutritionnels très différents. Une telle UF pourrait cependant être intéressante pour l'ACV de produits alimentaires au sein d'un pays dont la population est particulièrement carencée en un nutriment en particulier (Saarinen et al., 2017). La FAO préconise ainsi de choisir l'UF en accord avec les besoins de la population cible et rappelle que les besoins peuvent être très différents d'une population à l'autre. De plus, pour certains auteurs, la prise en compte de la quantité de nutriment présente dans un produit au sein de l'UF n'est pas suffisante. C'est le cas par exemple de Berardy et al. (2019) qui ont choisi d'inclure le score DIAAS (digestible indispensable amino acid score) au sein d'une UF en plus de la masse de protéines par portion. Ceci permet de ne pas se limiter à une masse de protéines mais d'inclure aussi une notion de qualité liée dans ce cas à la digestibilité des acides aminés de ces protéines.

Une autre limite à l'utilisation d'une UF basée sur un nutriment unique est que la masse de produit qu'il est nécessaire de consommer pour atteindre une certaine quantité de ce nutriment n'est pas forcément représentative des quantités réellement consommées. Saarinen et al. (2017) expliquent ainsi que pour atteindre 84,4 g de protéines (correspondant aux apports journaliers recommandés), il faut consommer 1,41 kg de pois cuits ou 290 g de bœuf sauté. De ce fait, même si en utilisant une UF basée sur les protéines, les pois ont des émissions de gaz à effet de serre inférieures à celles du bœuf (ce qui signifie que la production de 1,41 kg de pois génère moins d'émission de gaz à effet de serre que la production de 290 g de bœuf), il sera difficile de couvrir les besoins en protéines d'un adulte moyen avec uniquement des pois. Il semble donc important de bien choisir l'UF en fonction de l'objectif de l'étude et de s'assurer que le flux de référence associé soit pertinent vis-à-vis de cet objectif.

Une autre limite à n'utiliser que la teneur en un nutriment est que la qualité nutritionnelle d'un aliment ne se limite pas à sa teneur en ce nutriment en particulier. C'est notamment pour cette raison que la FAO préconise que les nutriments qui ne sont pas inclus dans l'UF (qu'ils soient à favoriser ou à limiter) soient également discutés au sein de l'étude (McLaren, 2021). Afin de répondre à cette limite, certains auteurs ont utilisé des UF basées sur des scores nutritionnels.

1.6.2.1.3. UF basée sur un score nutritionnel

Les scores nutritionnels présentent l'avantage de mieux refléter la qualité nutritionnelle globale d'un produit alimentaire qu'un nutriment seul. Parmi les différents scores ayant déjà été utilisés en tant qu'UF, nous pouvons distinguer les scores nutritionnels n'incluant que des nutriments

à favoriser et les scores nutritionnels incluant à la fois des nutriments à favoriser et des nutriments à limiter. Il est également possible de distinguer les scores nutritionnels spécifiques à une catégorie d'aliments aux scores nutritionnels plus généraux.

Le FNIprot7 est un exemple de score nutritionnel n'incluant que des nutriments à favoriser. Ce score inclut 7 nutriments à favoriser (fibres, acides gras mono et polys insaturés, calcium, fer, riboflavine et acide folique) et est un score spécifique aux sources de protéines. De même, comme exemple de score nutritionnel global utilisé comme UF et regroupant des nutriments à favoriser, nous pouvons citer le NRF9 (Nutrient Rich Food Index) incluant 9 nutriments à favoriser. Saarinen et al. (2017) ont utilisé ces deux scores comme UF afin de comparer le potentiel de réchauffement climatique de différentes sources de protéines animales et végétales. Il apparaît que l'utilisation de ces scores entraîne une évolution des conclusions établies avec une UF massique. Par exemple, avec une UF massique, le bœuf et le mouton apparaissent comme ayant les plus forts impacts alors qu'avec les UF basées sur NRF9 et FNIprot7, le bœuf est le 4^{ème} et le mouton le 3^{ème} produits ayant le plus d'impacts. Avec ces UF, les fromages emmental et edam apparaissent comme étant les produits les plus néfastes pour l'environnement. De manière générale, l'utilisation du NRF9 avantage beaucoup d'aliments d'origine animale (à l'exception de certains poissons) ainsi que certains haricots et noix. FNIprot7 favorise quant à lui davantage les poissons sauvages ainsi que les pois et certaines noix. Ceci montre que le choix du score nutritionnel et donc des nutriments pris en compte au sein de l'UF peut fortement influencer les résultats obtenus.

Sonesson et al. (2019) ont quant à eux étudié les effets de l'utilisation de deux scores nutritionnels en tant qu'UF : le NRF9.3 (qui prend en compte les mêmes nutriments que le NRF9 ainsi que 3 nutriments à limiter) et un score prenant en compte le régime alimentaire (NQI). Deux scénarios ont été étudiés : un scénario représentant le régime suédois moyen et un scénario représentant un régime alimentaire de mauvaise qualité nutritionnelle. Différents produits alimentaires ont été comparés tels que le pain, les pommes, les tomates, le lait, le fromage ou encore le poulet. Les résultats ont montré que les résultats étaient différents entre les UF NRF9.3 et NQI ainsi qu'entre les deux scénarios alimentaires. Ces résultats montrent que l'utilisation du NQI permet de mieux prendre en compte le régime alimentaire, ce qui pourrait avoir de l'intérêt pour améliorer les impacts environnementaux des produits à l'échelle du régime alimentaire. Néanmoins, les auteurs préviennent que l'approche n'en est qu'à ses débuts et qu'elle devrait être davantage validée et perfectionnée.

L'utilisation de scores nutritionnels incluant à la fois des nutriments à favoriser et des nutriments à limiter est cependant sujette à controverse. D'une part, il est mis en avant que la notion d'UF n'est pas de représenter des effets négatifs (Saarinen et al., 2017). De plus, l'inclusion de nutriments à limiter peut engendrer des scores négatifs selon les modes de calcul, ce qui peut être problématique pour le calcul et l'interprétation des impacts environnementaux (Saarinen et al., 2017). D'autre part, Green et al. (2020) mettent en avant que la non-inclusion des nutriments à limiter dans le score nutritionnel peut biaiser les résultats en ne représentant pas bien la qualité nutritionnelle réelle. Certaines approches proposent ainsi d'étudier les

nutriments à limiter séparément (Saarinen et al., 2017), ce qui peut être un compromis intéressant. La FAO préconise également d'étudier les nutriments à limiter par l'intermédiaire d'un score indépendant plutôt que de les inclure dans l'UF (McLaren et al., 2021).

1.6.2.1.4. UF nutritionnelle autre

Weidema et Stylianou (2020) s'appuient sur les résultats de Chambers et al. (2015) qui ont montré que, pour une même teneur énergétique, les produits alimentaires riches en protéines et en fibres permettent une meilleure sensation de satiété chez le consommateur que les produits alimentaires riches en glucides, en gras et ayant un goût sucré. Ils considèrent ainsi la notion de satiété comme pouvant être une UF d'intérêt pour comparer différents produits alimentaires. La principale limite à l'utilisation d'une telle UF est le manque de données liées à la satiété induite par différents types d'aliments et la difficulté à les acquérir. Chapa et al. (2020) ont également utilisé la notion de satiété comme UF via l'utilisation du « Fullness Factor ». Cette UF pourrait être intéressante puisqu'elle semble être à l'interface entre la dimension nutritionnelle (étant donné que certains nutriments contribuent davantage à la satiété que d'autres) et la dimension sensorielle.

1.6.2.1.5. Limites à l'utilisation d'UF nutritionnelles

Comme cela a été montré dans le paragraphe précédent, l'utilisation d'UF nutritionnelles peut engendrer des résultats très différents de ceux obtenus avec une UF massique. Bien que l'inclusion de la dimension nutritionnelle dans l'UF semble être une option intéressante pour une meilleure prise en compte des fonctionnalités alimentaires lors d'une ACV, aucun consensus n'a pour l'heure été établi vis à vis du choix de cette UF. Certains auteurs émettent même des réserves quant à la mise en œuvre d'une telle pratique. Par exemple, la plupart des scores nutritionnels sont basés sur des recommandations propres au pays dans lequel l'étude est conduite. Les études utilisant un certain score nutritionnel en tant qu'UF ne peuvent donc pas forcément être généralisables à d'autres pays. Ainsi, malgré l'émergence de nombreuses UF nutritionnelles, aucun consensus n'a pour l'heure été établi, rendant ainsi les résultats d'ACV obtenus dans différentes études, et faisant intervenir des UF différentes, difficilement comparables (Bianchi et al., 2020).

La pertinence du choix de la qualité nutritionnelle comme UF pour comparer différents produits alimentaires est également sujette à discussion. En effet, l'apport nutritionnel n'est pas l'unique fonction d'un aliment. Ainsi, bien que la fonction initiale d'un aliment soit l'apport de nutriments et d'énergie nécessaires à la vie (Burgess et Glasauer, 2004), l'aliment peut également remplir bien d'autres fonctions. Il peut notamment procurer un plaisir sensoriel, un bien être émotionnel ou encore remplir une fonction sociale comme par exemple l'appartenance à un groupe d'individus (McLaren et al., 2021). L'ensemble de ces fonctions ne sont pas reflétées par une UF basée uniquement sur la qualité nutritionnelle. Néanmoins, l'UF ne peut représenter toutes les dimensions de qualité d'un produit alimentaire. D'une part, elle

doit, pour des raisons calculatoires, être quantitative et ne peut donc pas refléter une dimension de qualité plus quantitative. D'autre part, il semble difficile d'inclure plus d'une dimension de qualité au sein de l'UF d'un point de vue pratique.

1.6.3. Utilisation d'un score synthétique

Bien que cela soit moins fréquent que la réalisation d'ACV faisant intervenir des UF nutritionnelles, plusieurs auteurs ont utilisé des scores permettant d'évaluer conjointement la dimension environnementale et nutritionnelle. Par exemple, Masset et al. (2014) ont utilisé un score de durabilité basé sur les émissions de gaz à effet de serre, le prix et les indicateurs nutritionnels SAIN et LIM afin d'évaluer 363 produits alimentaires parmi les plus consommés en France. Il s'agit d'un score basé sur 3 points. Pour le calculer, les médianes des émissions de gaz à effet de serre, des scores SAIN/LIM et des prix des 363 produits ont été utilisées. Chaque produit gagne un point si ses émissions de gaz à effet de serre sont inférieures à la médiane, 1 point si son score SAIN/LIM est supérieur à la médiane, et 1 point si son prix est inférieur à la médiane. Ainsi, les produits ayant obtenu un score de 3 sont considérés comme étant les plus durables et ceux ayant obtenu un score de 0 les moins durables. Les produits ayant obtenus les meilleurs scores sont majoritairement des produits végétaux. De même, Smedman et al. (2010) ont également proposé un score ayant pour objectif de refléter à la fois la qualité nutritionnelle et la qualité environnementale de boissons. Ce score s'appelle le NDCI (Nutrient Density to Climate Impact Index) et consiste à diviser la densité nutritionnelle du produit par ses émissions de gaz à effet de serre pour 100g. Les NDCI de différentes boissons (eau, lait, jus d'orange, vin, boisson à l'avoine, boisson au soja) ont été calculés. Le lait est la boisson ayant obtenu le meilleur score NDCI. Scarborough et Rayner (2010) ont toutefois remis en cause la pertinence et l'objectivité d'un tel score. Quoiqu'il en soit, une des limites à ce type d'approche est le possible manque de transparence des résultats obtenus qui ne permettent pas d'identifier immédiatement les contributions des différentes dimensions prises en compte.

1.6.4. Utilisation d'outils d'aide à la décision multicritère : Une option intéressante

Une option intéressante pour coupler la dimension environnementale à plusieurs autres dimensions de la qualité d'un produit alimentaire est l'utilisation de méthodes d'aide à la décision multicritère (Multi-criteria decision-aid (MCDA)). Il existe de nombreuses taxonomies permettant de classer les MCDA. Sadok et al. (2008) utilisent la taxonomie de Hwang et Yoon selon laquelle les MCDA se divisent en deux catégories. D'une part, les méthodes d'aide à la décision mutli-objectifs (Multi-objective decision making (MODM)) et d'autre part, les méthodes d'aide à la décision multi-attributs (Multi-attribute decision-making (MADM)). Les MODM sont utilisées dans des cas où le problème décisionnel fait intervenir un très grand nombre, voire un nombre infini d'options, dans l'objectif de déterminer la meilleure option selon des contraintes imposées. Les MADM sont utilisées dans des cas où le nombre d'options étudiées est plus restreint. Le terme MCDA est souvent utilisé pour désigner les MADM dans

les publications, ce que nous ferons dans la suite de ce manuscrit. La majorité des MCDA peuvent être classées dans l'une de ces catégories : les méthodes utilitaires multi-attributs, les méthodes de sur-classement, et les méthodes mixtes. Les méthodes utilitaires multi-attributs permettent de synthétiser la performance des options étudiées en fonction des différents critères choisis par l'intermédiaire d'un score obtenu par agrégation totale. Contrairement aux méthodes utilitaires multi-attributs, les méthodes de sur-classement ne pratiquent pas l'agrégation totale sous forme d'un score. Leur objectif est de déterminer le degré de dominance d'une option par rapport à une autre, en comparant les options paire à paire (Dean, 2022). Les méthodes mixtes correspondent, quant à elles, à des méthodes capables de gérer des critères qualitatifs et quantitatifs et/ou présentant un modèle différent de ceux classiquement utilisés (Sadok et al., 2008). Sadok et al. (2008) ont étudié l'adéquation de ces différentes catégories de MCDA avec l'étude de la durabilité des systèmes agricoles. Le tableau 1.5 présente les principales conclusions issues de cette étude.

Tableau 1.5. Comparaison de différentes MCDA pour l'évaluation de la durabilité de systèmes agricoles (adapté de Sadok et al., 2008)

	exemple	Capacité à gérer l'incommensurabilité, la non compensation et l'incomparabilité des critères	Capacité à gérer des critères qualitatifs ou mixtes	Pertinence pour l'étude de la durabilité des systèmes agricoles
Multi-attribute utility methods	AHP*	-	-/+	--/+
Outranking methods	ELECTRE*	+	-	-/+
Mixed methods	DEX*	+	+	+

*AHP (Analytic Hierarchy process); ELECTRE (ELimination and Choice Expressing Reality), DEX (Decision EXpert)

Afin de déterminer l'adéquation de chaque type de méthode à l'étude de la durabilité des systèmes agricoles, Sadok et al. (2008) se sont penchés sur leur capacité à gérer certaines caractéristiques des critères pouvant être utilisés pour définir la durabilité des systèmes agricoles. Les auteurs ont ainsi étudié la capacité des MCDA à gérer l'incommensurabilité, la non compensation, l'incomparabilité ainsi que les différentes natures (quantitatives, qualitatives) des critères utilisés. Il apparaît que certaines méthodes permettent de mieux faire face à ces difficultés que d'autres (Sadok et al., 2008). Par exemple, la plupart des méthodes de type multi-attributs ne permettent pas de prendre en compte l'incommensurabilité, ce qui peut poser problème si l'objectif est de travailler avec des indicateurs n'ayant pas d'échelle commune (Munda et al., 1994). Au contraire, les méthodes mixtes, telles que la méthode DEX (implémentée sur le logiciel DEXi), permettent de bien gérer ces contraintes, ce qui en fait de bons candidats pour l'étude de la durabilité des systèmes agricoles.

1.6.4.1. La méthodologie DEX et le logiciel DEXi

La méthode DEX (Decision EXpert) est une méthodologie de modélisation qualitative (Bohanec et al., 2013). DEX est considérée comme une méthode mixte consistant à décomposer le problème de décision en sous-problèmes moins complexes qui sont ensuite hiérarchisés. DEX a été implémenté dans différents programmes informatiques. Le premier était DECMAX, suivi par DEX et enfin DEXi depuis 2000 (Bohanec et al., 2013). Le développement de modèles sur DEXi nécessite de définir des variables qualitatives représentant les sous-problèmes du système de décision, des échelles qualitatives (ex : "élevé", "moyen", "faible") qui seront utilisées pour évaluer ces variables, un arbre de décision décomposant le système de décision, et des règles d'agrégation de type "if-then" entre les différentes variables le long de l'arbre de décision (Bohanec, 2013).

1.6.4.2. Utilisation de DEXi pour l'évaluation de la durabilité

Le logiciel DEXi a été utilisé pour développer différents outils visant évaluer la durabilité de systèmes de production agricole. Le modèle MASC (Multi-attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems) en est un exemple. Le modèle MASC, dont la première version a été publiée en 2009, a pour objectif l'évaluation ex-ante de la durabilité de systèmes de production agricole en se basant sur trois dimensions (environnementale, économique et sociale) chacune subdivisée en différents sous-critère et indicateurs. La Figure 1.5. présente une version simplifiée de l'arbre hiérarchique du modèle MASC 2.0, deuxième version du modèle MASC, publiée en 2012.

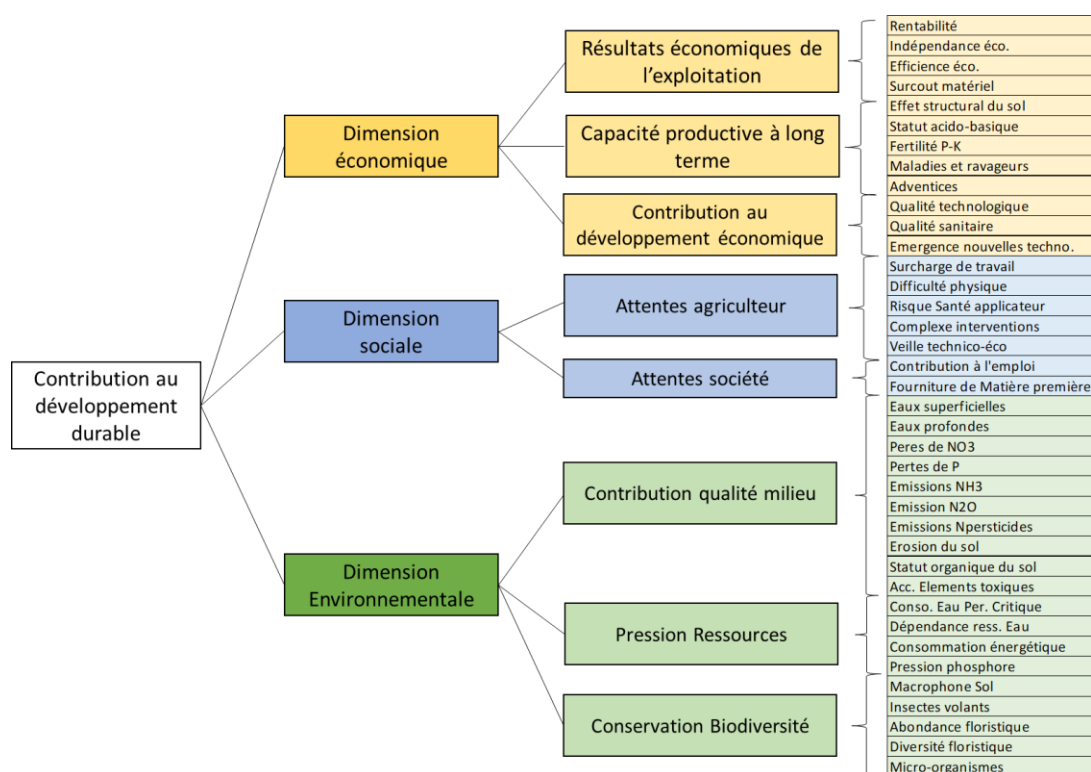


Figure 1.5. Arbre hiérarchique du modèle MASC 2.0 (figure adaptée de Craheix et al., 2012)

D'autres modèles d'aide à la décision multicritère dédiés à l'évaluation de la durabilité de systèmes agricoles ont également été développés sur DEXi, tels que DEXiAqua (Le Féon, 2021) permettant l'évaluation de la durabilité des systèmes d'aquaculture ou encore DEXifruit (Alaphilippe et al., 2017) permettant l'évaluation des systèmes de production de fruit.

A notre connaissance, le logiciel DEXi n'a jamais été utilisé pour traiter des problématiques en lien avec la conception de produits alimentaires en prenant en compte les dimensions environnement, nutrition et sensoriel. Néanmoins, les avantages que présentent ce logiciel et la méthode DEX sous-jacente laissent à penser qu'il pourrait être bien adapté à la gestion de ces dimensions très différentes. De plus, DEXi présente l'avantage d'être transparent, permettant d'identifier facilement la contribution des différentes dimensions au résultat final, ce qui permettrait d'identifier facilement des pistes d'amélioration de la qualité du produit. En effet, en plus de fournir un score agrégé, DEXi permet à l'utilisateur de visualiser l'évaluation de chacun des critères et indicateurs. Ceci peut s'avérer particulièrement utile dans une démarche de re-conception afin d'identifier facilement les aspects à améliorer.

Ce qu'il faut retenir du chapitre 1 en lien avec la thèse

L'ACV classiquement utilisée pour l'évaluation de la performance environnementale de produits alimentaires repose sur une UF massique ne témoignant pas de la qualité du produit étudié. Ceci est une limite à son utilisation en conception de produit car l'ACV aura alors tendance à encourager le développement de produits lourds plutôt que de bonne qualité. Il semble donc important de coupler la qualité environnementale d'un produit calculée par ACV à d'autres dimensions de qualité afin d'éviter ce biais.

Les études portant sur le couplage entre la dimension environnementale et la dimension nutritionnelle sont de plus en plus nombreuses, ce qui témoigne d'un intérêt grandissant pour cette problématique. Les couplages entre la dimension environnementale et la dimension sensorielle sont quant à eux beaucoup moins fréquents.

Les indicateurs généraux utilisés pour mesurer la performance d'un produit alimentaire en termes de qualité sanitaire, sensorielle, nutritionnelle et environnementale sont de natures très différentes.

La performance environnementale et nutritionnelle des régimes alimentaires et des produits alimentaires ne sont pas forcément positivement corrélées. Néanmoins, les études existantes comparent des produits de catégories différentes.

Si ces résultats se confirment à l'échelle d'une catégorie de produits alimentaires, cela peut être une difficulté pour concevoir un produit en incluant ces différentes dimensions.

Il est possible d'intégrer la dimension nutritionnelle au sein de l'UF lors d'une ACV de produit alimentaire. Ceci permet d'une part de répondre à la limite que représente l'usage d'une UF massique et d'autre part de coupler les dimensions environnementale et nutritionnelle. Néanmoins, l'inclusion au sein de l'UF semble plus difficile pour une dimension pouvant être qualitative telle que la dimension sensorielle. De plus, il semble difficile d'intégrer plusieurs dimensions au sein de l'UF.

Il n'existe pas de méthode permettant de coupler simultanément les dimensions environnementale, nutritionnelle et sensorielle dans un objectif de conception de produit alimentaire.

L'utilisation d'une méthode MCDA mixte telle que DEXi semble être une possibilité intéressante pour évaluer la qualité d'un produit alimentaire en prenant en compte différentes dimensions telles que la dimension environnementale, la dimension nutritionnelle et la dimension sensorielle.

CHAPITRE 2 : VARIABILITE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ENTRE DES PRODUITS ALIMENTAIRES D'UNE MEME CATEGORIE ET LIEN AVEC LEUR COMPOSITION NUTRITIONNELLE

Ce chapitre porte sur l'étude de la variation des impacts environnementaux au sein d'une même catégorie de produit. Il a plusieurs objectifs en rapport avec la problématique de thèse. Le premier est de déterminer dans quelle mesure des produits alimentaires d'une même catégorie peuvent être considérés comme étant similaires ou non en termes de performance environnementale ainsi que d'identifier de potentiels leviers d'écoconception intra-catégorie. Notre hypothèse est que la variabilité des impacts environnementaux intra-catégorie est suffisamment importante pour permettre des actions d'écoconception efficaces. Le deuxième objectif est d'identifier les relations pouvant exister entre la dimension environnementale et nutritionnelle au sein d'une même catégorie. Le dernier objectif est de collecter des données de performances environnementales qui serviront de base aux prochains chapitres.

Pour ce faire, deux modèles ont été étudiés : d'une part, un échantillon de 80 pizzas industrielles représentatives du marché français et d'autre part, 44 fromages AOP artisanaux français.

Ainsi, au sein de ce chapitre, deux des 4 axes de recherche liés à la problématique seront abordés : d'une part, l'étude de la variabilité de la qualité environnementale des produits alimentaires d'une même catégorie et d'autre part le lien entre la qualité environnementale et la qualité nutritionnelle des produits alimentaires d'une même catégorie (Figure 2.1).

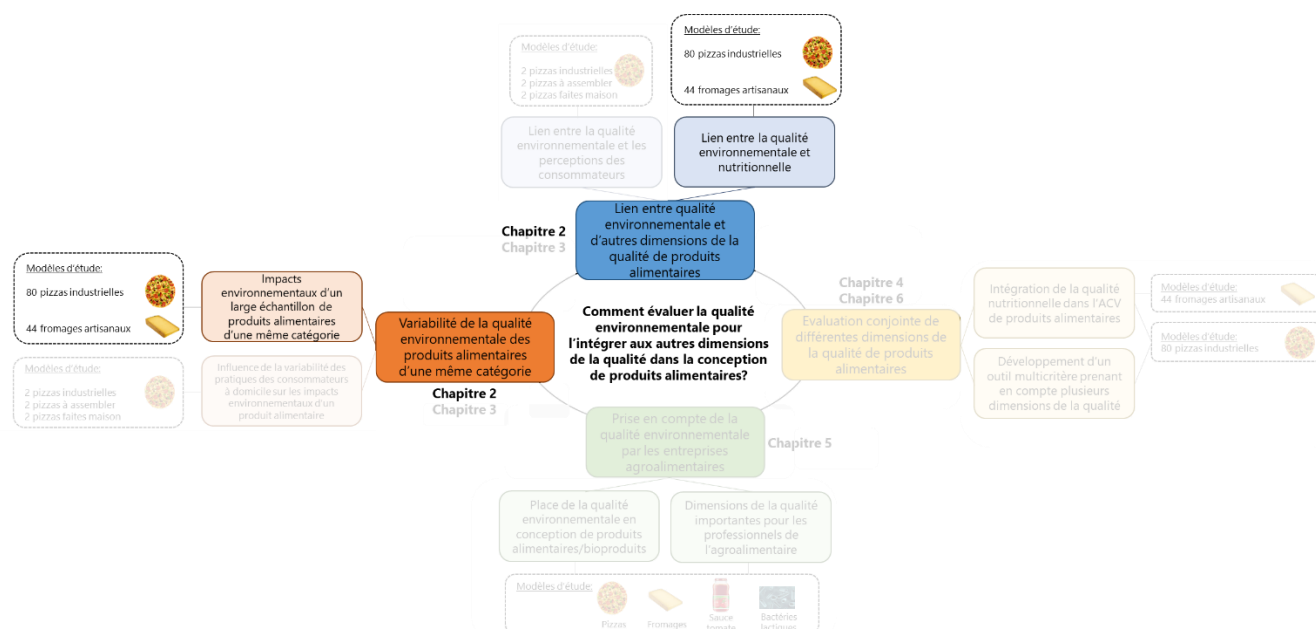


Figure 2.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 2

2.1. COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE 80 PIZZAS INDUSTRIELLES ET ETUDE DU LIEN ENTRE LEUR PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE ET LEUR COMPOSITION NUTRITIONNELLE (ARTICLE 1)

2.1.1. Résumé

Dans le cas des produits alimentaires, les ACV sont souvent réalisées sur un seul représentant d'une catégorie d'aliments, ce qui ne permet pas de comprendre les variations possibles d'impacts environnementaux pouvant exister entre des produits appartenant à la même catégorie. Dans cet article, nous avons cherché à évaluer et à comparer les impacts environnementaux d'un large éventail de produits alimentaires appartenant à une même catégorie. Pour ce faire, la catégorie de produits alimentaires choisie comme modèle d'étude est la catégorie « pizzas industrielles ». Cette catégorie a été choisie pour deux raisons. La première est que les pizzas sont des produits très consommés à travers le monde. La deuxième est que les pizzas industrielles peuvent être très différentes les unes des autres notamment en termes de recettes, de profils nutritionnels, de distributeurs ou encore de conditions de stockage. Ainsi, les impacts environnementaux de 80 pizzas représentatives du marché français de 2010 ont été étudiés par ACV, en utilisant 1 kg de pizza prête à consommer comme unité fonctionnelle et la méthode EF 3.0 pour la caractérisation des impacts. Les ACV ont montré que la production des ingrédients était l'étape de la production de la pizza ayant la plus grande influence sur la performance environnementale des pizzas. De plus, l'analyse statistique des résultats a montré que le distributeur et le mode de stockage (frais/surgelé) des pizzas ne semblent pas permettre de discriminer les impacts environnementaux des pizzas. Au contraire, les recettes des pizzas ont une influence significative sur la performance environnementale des pizzas étudiées. En effet, les pizzas contenant du bœuf ont tendance à avoir des impacts environnementaux significativement plus élevés que les autres. De plus, la teneur en fromage des pizzas tend à être positivement corrélée à leurs impacts environnementaux. Enfin, nous avons observé que plus les teneurs en protéines, en lipides et en acides gras saturés des pizzas sont élevées, plus leurs impacts environnementaux tendent à être importants pour la plupart des indicateurs environnementaux étudiés. Ces résultats pourraient être utiles aux ACVistes souhaitant renforcer leurs connaissances relatives aux impacts environnementaux des aliments, aux entreprises souhaitant développer des produits plus durables, ainsi qu'aux consommateurs désireux de faire des choix alimentaires plus durables.

2.1.2. Article 1 : Does environmental impact vary widely within the same food category?
A case study on industrial pizzas from the French retail market

Article publié dans **Journal of cleaner production**.

Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022. Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market. Journal of Cleaner Production 336, 130128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130128>

Data paper associé publié dans **Data in Brief** (disponible en Annexe 1).

Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022. Life cycle inventory and assessment data for quantifying the environmental impacts of a wide range of food products belonging to the same food category: A case study of 80 pizzas representatives of the French retail market. Data in Brief 41, 107950. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107950>

Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market

Adeline Cortesi¹, Caroline Pénicaud¹, Anne Saint-Eve¹, Louis-George Soler², Isabelle Souchon³

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

² Université Paris-Saclay, INRAE, UR ALISS, 94205, Ivry-sur-Seine, France

³ Avignon Université, INRAE, UMR SQPOV, 84000, Avignon, France

Abstract

There is an urgent need to reduce the strong environmental impact of food production and consumption, which are expected to increase in the coming years due to the growing world population. Life cycle assessment (LCA) is a known method for environmental evaluation worldwide. In the case of food products, LCA are often carried out on a single representative of a food category, which does not allow an understanding of possible variations in the environmental impact between products belonging to the same category. We aimed to assess and compare the environmental impact of a wide range of food products belonging to the same food category. The study model chosen was industrial pizza, because of its high consumption worldwide and its large range of recipes, as well as its various storage conditions (fresh or frozen), distributors, and nutritional content. Thus, we assessed the environmental impact of 80 pizzas representative of the 2010 French retail market by LCA, using 1 kg of ready-to-eat pizza as the functional unit and the EF 3.0 method for impact characterization. LCA showed ingredient production to be the stage of pizza production with the highest impact. Moreover, statistical analysis of the results showed that the sector and distribution mode of the pizzas do not appear to have an influence on their environmental impact. On the contrary, the pizza recipes have a significant influence on the environmental impact of industrial pizza. Indeed, pizzas containing beef have a significantly higher environmental impact than the others and the cheese content of pizzas positively correlates with their environmental impact. Finally, we observed that the higher the protein, fat, and saturated fatty acid content of the pizzas studied, the greater their environmental impact in most of the studied environmental impact categories. These results could be useful for LCA practitioners who want to strengthen our knowledge on the environmental impact of food and companies that want to develop more sustainable products, as well as for consumers who want to make more sustainable choices.

Keywords: life cycle assessment (LCA), food industry, supply chain, processed food, recipe

1. Introduction

Food production is among the human activities with the highest environmental impact, accounting for 20 to 30% of the environmental impact in Europe (Tukker et al., 2006). For example, the United Nations (2021) estimates that it is responsible for a third of global greenhouse gas emission worldwide. The situation is all the more alarming because of the predicted increase in the global population, which the United Nations estimates will reach 9.8 billion by 2050 (UN, 2017). For this reason, the United Nations include "responsible consumption and production" as one of its 17 sustainable development goals (UN, 2020) and the European commission included the goal to "lead a global transition towards competitive sustainability from farm to fork" in its European Green Deal Program (European commission, 2019).

Improving the environmental performance of food production is therefore a key issue for the overall reduction of the environmental impact of human activity. Two complementary options can be considered to achieve this goal (Desorge et al., 2017). The first is to encourage food manufacturers to produce more environmentally friendly products. This would likely require the creation of tools that would encourage the reformulation of products through, for example, new standards, regulations, or taxes. The second option focuses more on consumers and consists of encouraging them to consume more environmentally friendly products through better consumer information. Improving consumer information could also encourage manufacturers to modify their offer, as shown for nutritional labeling (Van der Bend et al., 2020).

Consumer interest in the environmental performance of the products they consume has increased in recent years (L'Obsoco, 2021). Indeed, a study carried out in several European countries showed that, on average, two thirds of the people questioned declared that they were ready to change their eating habits to benefit the environment. The main changes they are willing to make are eating more seasonal fruits and vegetables and limiting domestic food waste. Nevertheless, the consumers questioned are clearly less inclined to replace certain foods by others or to reduce their consumption of foods that have a particularly high impact on the environment. Thus, only one of three declared that they were ready to reduce their consumption of red meat and only 20% to reduce their consumption of dairy products (BEUC, 2020).

Improving the environmental quality of our diets should not, however, come at the expense of the nutritional quality of the foods, which plays a predominant role in preventing many diseases such as cancers (Kerschbaum et al., 2019) and heart diseases (Houston et al., 2018). The nutritional quality of food products is a more important choice criterion for consumers than its environmental quality (Saint-Eve et al. 2021).

Hence, the environmental impact of food products is not yet a major choice criterion for consumers, coming after price and nutritional criteria (Desorge et al., 2017). It is unlikely that consumers will radically change their eating habits to reduce their impact on the environment.

They would probably be more inclined to replace a usually consumed product by one belonging to the same product category but with a lower environmental impact (Soler et al., 2020).

The main objective of this study is to answer the following question: could the substitution of a product by an equivalent product within the same food category improve the environmental performance of food choices? To answer this question, we studied if it is possible to discriminate between products belonging to the same category according to their environmental impact. We also studied links between the environmental and nutritional performance of food products.

We addressed these questions using pizza as a study model. By definition, pizza is “a dish of Italian origin, consisting of a flat round base of dough baked with a topping of tomatoes and cheese, typically with added meat, fish, or vegetables” (Lexico, 2021). France, along with the United States, is the largest consumer of pizza in the world and its consumption is estimated to be 10 kg per person per year (PIC International, 2020). Pizzas can be divided into several groups, mainly homemade pizzas, artisanal pizzas, and industrial pizzas. We chose industrial pizza as our study model because it covers a multitude of products that can vary in terms of their recipe and filling (for example with or without meat), distributor, mode of preparation, and even sector (fresh/frozen).

In this context, our goal was to study the possible variability in the environmental impact within the same category of food products: industrial pizzas sold in the French retail market. We also wanted to identify the hotspots, i.e., the stages, of pizza production/consumption with the highest environmental impact and determine the parameters that influence the environmental impact of pizzas. Another objective was to understand the potential link between environmental performance and the nutritional quality of industrial pizza.

Several methods are available to measure environmental impact, although there is no international consensus for any of them. In this study, we used life cycle assessment (LCA), the most scientifically recognized environmental analysis tool worldwide, standardized by the ISO 14044, 2006 standard (EN ISO 14044, 2006). As detailed in section 2, it is widely used in the agrifood sector.

The originality of this work lies in the fact that no study has thus far investigated the variation of environmental impact within a large sample of food products belonging to the same category. The results of this study may be useful for LCA practitioners, who will gain insights into the most important points to consider when measuring the environmental impact of products within the same food category. The results may also be of interest for pizza manufacturers who wish to design more environmentally friendly pizzas, as well as of use to help consumers to make more sustainable food choices.

2. LCA in the agrifood sector: a brief overview

LCA is widely used for studies in the agrifood sector, with a steady increase in the number of food products that have been analyzed (Cucurachi et al., 2019). LCA is performed for products in the agrifood sector for two main purposes: to identify hotspots in the production of the product and to compare products or production scenarios between them.

2.1. Identification of the hotspots of a production system

This type of analysis provides a better understanding of the environmental performance of a production system, while also making it possible to increase efforts on the most environmentally damaging stages. A literature review of the LCA of several food products, such as industrial food products (i.e., bread, tomato ketchup), dairy and meat products, and other products, such as rice or potatoes, showed that the stage of agricultural production is often that with the highest environmental impact (Roy et al., 2009). This conclusion has been confirmed by more recent studies. For example, milk production was shown to be by far the largest hotspot in the production of Grana Padano cheese (Bava et al., 2018). Similarly, a literature review of 23 articles on the LCA of olive oil production chains showed that the phase with the highest impact was generally the agricultural phase (Espadas-Aldana et al., 2019). This was notably due to the fertilization and irrigation of the soil during olive production, as well as pesticide use.

However, observations may differ between studies. For example, packaging (metal cans) was shown to be the stage with the highest environmental impact in the manufacturing of tomato puree for all impact categories, except acidification and eutrophication (Shahvarooghi Farahani et al., 2019). For those two indicators, tomato cultivation was the hotspot.

2.2. Comparison of different production methods for the same product

LCA is also widely used in the food industry to compare the environmental performance of different production scenarios. For example, it was found that high moisture extruded patties had a lower environmental impact than low moisture extruded patties and that this method of extruding vegetable proteins should be encouraged to reduce the environmental impact of extruded meat substitutes (Saerens et al., 2021). LCA has also been used to compare production scenarios at different scales (home baking, local bakery, and two different industrial bakeries) for bread production, showing that industrial production contributes the most to global warming, acidification, and eutrophication (Andersson and Ohlsson, 1999).

2.3. Comparison of two different products

LCA is also used to compare the environmental impact of different products. For example, Bianchi et al. (2021) compared the environmental impact of white, dark, and milk chocolate by

LCA. Their study concluded that dark chocolate is that with the lowest environmental impact and that the environmental impact of white and milk chocolate is quite similar. Furthermore, because animal-based foods are considered to have a particularly high environmental impact, several studies compared the environmental impact of animal-based food products to their plant-based alternatives. For example, plant-based burger patties were shown to have an impact that was at least 10 times lower than that of meat burgers (Saerens et al., 2021). This was also shown by Grant and Hicks (2018), who compared the environmental impact of cow's milk to that of plant milk (almond and soy). They showed dairy milk to have the highest environmental impact for six of the 12 impact categories studied in the article.

2.4. Comparison of products within the same food category

LCA of food products are often performed for only one or a few specific products and the values obtained are therefore assumed to reflect the environmental impact of all products belonging to the same category. This is true, for example, for a study conducted by Stylianou et al. (2020), who compared one representative of vegetarian pizzas to one of meat pizzas and concluded that meat pizzas are responsible for the emission of more greenhouse gases than vegetarian pizzas. Several authors have also compared food products to each other based on the environmental impact value of a single representative of a product category, such as Saarinen et al. (2017), who, compared the category of Emmental cheese to that of grilled sausage. The main conclusions of these authors, who wanted to compare the environmental performance of different protein sources, were that meat products and cheese are responsible for a greater climate impact than fish and plant-based proteins (peas, soybeans, etc.) for a functional unit based on 100 g of product. Such an approach does not account for the wide variety of products that may exist within the category of Emmental cheese or worse, grilled sausage. Although a few studies have investigated the environmental impact of different products within the same category, the number of products analyzed has been very limited and is far from being representative of all products in the category on the market. For example, a study conducted by Dalla Riva et al. (2017) compared the environmental impact of two types of mozzarella, one considered to be high-moisture and the other low-moisture. However, there is often a wide variety of products within the same product category, especially for processed products composed of a large number of ingredients. A better understanding of the possible differences in the environmental impact between products belonging to the same category could help to improve the overall environmental quality of our food through recommendations of reformulations to food manufacturers and/or advice to consumers on how to substitute one product for another.

2.5. Environmental impact of food and nutrition

The nutritional properties of foods are highly important for consumer health and are therefore a significant criterion for consumers when purchasing food products (Desorge et al., 2017). For

this reason, several studies on the environmental impact of the food sector have also included the nutritional values of products to better understand the relationship between these two dimensions. This has been done at different scales.

At the scale of the food product, for example, the variability of the impact of different seafoods consumed in Sweden was studied (Hallström et al., 2019). The environmental impact (greenhouse gas emissions) and nutritional quality did not correlate for all species and the authors found that pelagic species were a good compromise, both for their nutritional interest and their moderate effect on the climate. Masset et al. (2014) also examined the relationship between environmental impact, environmental quality, and the price of 363 food products representative of the average French diet. Among the foods considered, they showed that those with a high environmental impact (greenhouse gas emissions, acidification, and eutrophication) tend to have lower nutritional quality (SAIN and LIM indicators).

At the meal scale, for example, the nutritional and environmental benefits of different Spanish tapas meals was assessed (Batlle-Bayer et al., 2020). Environmental performance was evaluated according to three environmental indicators: global warming potential (GWP), blue water footprint (BWF), and land use (LU), taking into account the energy and nutrient content within the functional unit. The results show that switching to more plant-based tapas can significantly reduce their impact on the evaluated environmental indicators. Similarly, a method to evaluate university canteen meals according to environmental and nutritional recommendations has been proposed (Cooreman-Algoed et al., 2020). This method aims to integrate both nutritional and environmental recommendations to help students make meal choices. One hundred meals from a Belgian canteen were classified according to their environmental impact (ReciPe single score) and their nutritional interest based on different nutrients to promote or limit their consumption. The results showed that dishes containing fish received the best grades and those containing meat from ruminant animals the worst.

At the diet level, it was shown that the northern regions of Spain have a better diet from a nutritional point of view and generated less greenhouse gases due to higher consumption of fruits and vegetables than in other regions (Chapa et al., 2020). Through the NutriNet study, Baudry et al. (2019) showed the consumption of organic food to be associated with higher consumption of plant-based food and lower consumption of animal-based food and better overall nutrition. They also showed that increased consumption of organic products tended to reduce the impact on greenhouse gas emissions, cumulative energy demand, and land occupation. In addition, it has also been shown that changes in food consumption patterns to meet French national dietary recommendations could reduce the overall impact of our diets on the environment by 50% (Kesse-Guyot et al, 2020), suggesting that there is a positive correlation between nutritional and environmental performance at the diet level.

3. Materials and methods

3.1. Product selection

In total, 80 pizzas representative of the French retail market in terms of composition, nutritional content, and economic value were selected from among 392. Details concerning the methodology used for the selection of the 80 pizzas are available in the "ANNEXE 4". The 80 selected pizzas belong to different families, sectors, and distributors. Families refer to the professional nomenclature of the pizzas and are based on the pizza filling. For example, the filling of "cheese" pizzas includes various types of cheese but no meat- or fish-based ingredients. Eight families are represented: *ham-cheese* (n = 24), *cheese* (n = 20), *margarita* (n = 4), *seafood* (n = 4), *meat* (n = 5), *Bolognese* (n = 5), *vegetables* (n = 3), and *cold cuts* (n = 15). Sectors refer to the storage method, in this case, fresh (n = 33) or frozen (n = 47). Distributors refer to the brand of the pizza. It can be a national brand (n = 20), a private brand (n = 39), the brand of a specialized distributor (for example from a supermarket specialized in frozen products) (n = 11), or a hard discount brand (n = 10).

3.2. System boundaries and functional unit

The stages of pizza production that we considered were ingredient production, manufacturing, transport of the pizza, distribution, and use (Figure 1). The assumptions associated with each of these stages are detailed in the associated data paper.

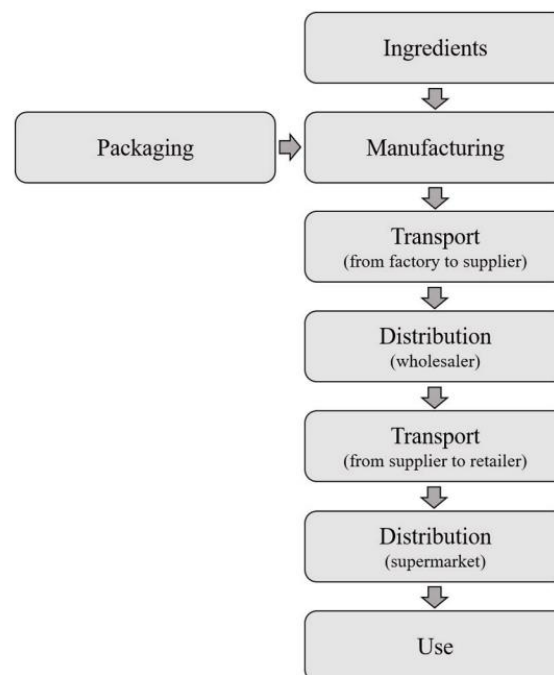


Figure 1. Steps in pizza production considered in the LCA

We considered that all the pizzas were produced in the same place, in France, and during the year 2010.

As the weight of the 80 pizzas studied varied, we chose not to compare the pizzas one by one but rather to compare identical masses of pizza. In addition, mass functional units are the most commonly used functional units for LCA of food products. We thus chose a functional unit of 1 kg of ready-to-eat pizza, i.e., pizza, fresh or frozen, after cooking at the residence of the consumer.

3.3. Data inventory

The inventory data used in this study were obtained in various ways. Details on the collection of all inventory data are available as supplementary tables in the co-submitted data-paper and are briefly summarized here.

3.3.1. Ingredients

The weights of the various ingredients were estimated from the ingredient lists and nutritional data on the packaging of each pizza.

3.3.2. Pizza manufacturing

The energy and water consumption data for the pizza manufacturing process were estimated using the technical data sheets for the machines used to produce the pizzas. If the technical data sheets did not allow estimation of the consumption of a machine, experts of food industrial processes were contacted to estimate the missing data.

3.3.3. Packaging

The weight of the packaging for each pizza was measured experimentally using a laboratory balance (± 0.1 g).

3.3.4. Transport

We assumed that the distance of transport of the pizzas from the factory to the wholesaler and from the wholesaler to the supermarket was the same for all pizzas: 1,000 km between the pizza factory and the supplier and 200 km between the supplier and the retailer.

3.3.5. Distribution

The duration of storage of the pizzas at the wholesaler and the supermarket, as well as the associated consumption, were estimated from the scientific literature (DEFRA, 2008).

3.3.6. Use

Data sheets of refrigerators, freezers and electric ovens were used to estimate the electrical consumption related to the storage and cooking of pizzas in the consumer's home.

3.4. Characterization of the environmental impact

LCA is a methodology defined as the evaluation of all inputs and outputs of the life cycle of a product system to assess its potential environmental impact (EN ISO, 2006). The LCA of the 80 pizzas were performed using SimaPro 9.1.0.11 software. The characterization method used was the EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set (Fazio et al., 2018). This characterization method was developed under the control of the European Commission and allows the calculation of 16 midpoint environmental indicators. These environmental indicators are climate change, ozone depletion, ionizing radiation, photochemical ozone formation, particulate matter, human toxicity non-cancer, human toxicity cancer, acidification, eutrophication marine, eutrophication freshwater, eutrophication terrestrial, ecotoxicity freshwater, land use, water use, resource use fossils and resource use minerals and metals. Each indicator is calculated using a specific method. Details about the calculations used to obtain these different indicators are available in Fazio et al. (2018). This method also allows the calculation of a score that aggregates all the environmental indicators using normalization and a weighted set (according to the reliability of each indicator) by the European Commission. All the midpoint impact categories available in this method and the single score were calculated. The results are all available as supplementary tables in the co-submitted data-paper. Nutritional data were obtained as explained in 3.1 and are available as supplementary tables in the co-submitted data-paper.

3.5. Treatment of the results

A number of statistical analyses were performed on the LCA results using the statistical software XLStat (version 2020, 5.1.1043).

Principal component analysis (PCA) is a descriptive representation that allows visualization of the groups of pizzas identified by clustering. PCA was performed on the total impact calculated for the production of each of the pizzas for various categories of environmental impact to obtain an overview of their global distribution. In particular, we wanted to determine whether pizzas cluster differently depending on their family, distributor, and sector.

Partial least squares regression (PLS- R^2) was used as a complement to PCA to study the relationships between all environmental indicators and the nutritional and composition indicators. Partial least squares regression is a decisional statistic that makes it possible to establish explanatory models to identify which combinations of variables explain what discriminates these groups.

The nutritional and compositional indicators considered were protein content (g/100 g), fat content (g/100 g), saturated fatty acid content (g/100 g), sugar content (g/100 g), sodium content (g/100 g), fiber content (g/100 g), filling mass to dough mass ratio, and animal product mass to vegetable product mass ratio. Finally, the correlations between all environmental indicators studied and the percentage of cheese, meat and fish, vegetables, and tomato sauce and dough were studied using PLS- R^2 .

The mean value of each pizza family was also calculated. The 80 pizzas were then ranked according to the average environmental impact of their families to estimate whether such ranking would be representative of the ranking of the true environmental impact of the pizza or not.

4. Results and Discussion

Each indicator of the EF3.0 method was considered to determine (i) the steps with the highest impact and (ii) correlations between the environmental impact of pizzas and their various characteristics, including nutritional and compositional characteristics.

4.1. Definition of the steps with the highest impact

The relative impact of each production step of one pizza among the 80 according to the various environmental impact indicators is shown in Figure 2, as an example. The distribution of the contribution of the various stages was similar for all pizzas. The detailed results are available as supplementary tables in the co-submitted data-paper.

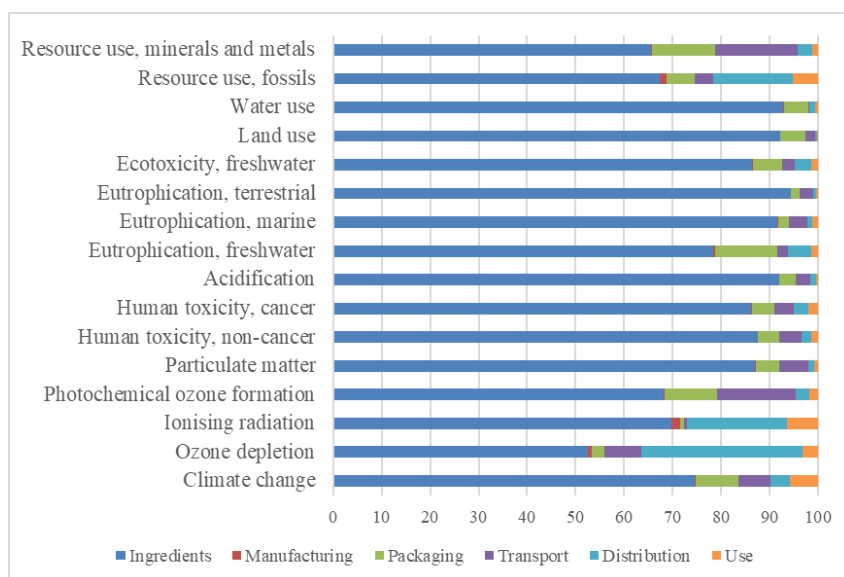


Figure 2. Contribution of each step of pizza production to each category of environmental impact computed using the EF3.0 method (example of one pizza: Ham-cheese, fresh, private brand)

The production of the ingredients is the step with the greatest impact for all studied environmental indicators (Figure 1). This observation was confirmed for all 80 pizzas studied. As for the other stages, the weight of the ingredient-production step on the total impact of the pizza varies according to the environmental indicator. For example, the ingredient-production stage is responsible for 41.1 to 92% of the total impact for the climate change indicator, depending on the pizza, representing an average of 74.8% (average over the 80

pizzas). This stage is followed by packaging (7.7% on average, from 2 to 19.6%), transport of the pizza (6.1%, from 2.7 to 11.2%), use (5.6%, from 1.6 to 13.6%), processing (3.0%, from 0.1 to 11.1%), and, finally, distribution (2.9%, from 1.2 to 5.7%). Even for the ozone depletion indicator, for which the relative contribution of the production of the ingredients is the lowest relative to the other indicators (Figure 1), the average contribution of each stage is as follows: ingredients (58.7% on average, from 23.3 to 84.4%), distribution (19.4%, from 5.1 to 42.2%), processing (7.2%, from 0.4 to 22.7%), transport of the pizza (6.7%, from 2.7 to 12.2%), use (4%, from 1.4 to 7.3%), and packaging (3.9%, from 0.8 to 11.9%). Such predominance of the ingredient-production stage on the environmental impact is in accordance with the observations of Weidema et al. (2008), who showed that the stage with the greatest impact in the production of dairy and meat products was the agricultural stage. However, several studies have shown that this predominance may vary depending on the impact category considered. For example, Kim et al. (2013) evaluated the environmental impact of mozzarella and cheddar cheeses for nine impact categories and showed that the agricultural phases (including inputs and agricultural activities) were responsible for more than 60% of the total environmental impact for seven. For the two remaining impact categories, namely cumulative energy demand and human toxicity, more than 50% of the total impact was attributed to activities after the agricultural phases, with a strong impact of the manufacturing and consumption stages for human toxicity. Dijkman et al. (2018) reviewed a number of studies, allowing them to conclude that the agricultural stages were major hotspots for different types of products, including meat, cheese, and bread, consistent with our results, as these products are important constituents of pizza. It is also consistent with the results of Roy et al. (2009), Bava et al. (2018), and Espadas-Aldana et al. (2019), who also concluded that the agricultural phase has the greatest impact on the environment.

However, we can qualify this statement because it is likely that the impact of the processing step is often underestimated due to the lack of data on this aspect. Indeed, as explained by Dijkman et al. (2018), as the first LCA conducted on food products showed that the agricultural phase had the greatest impact, most studies have since focused on this phase. This phenomenon explains the current lack of data on processing stages. Therefore, it would be informative to carry out on-site measurements to better account for the environmental impact of the processing stage of pizza production.

4.2. Environmental impact of the 80 pizzas

The repartition of the 16 environmental indicators for the 80 pizzas studied is shown in Figure 3.A. The repartition of the 80 pizzas (added to the PCA as supplementary observations) in Figure 3.A is shown in Figure 3.B. Each point in figure 3.B represents one pizza, with the color indicating the family. The same data as in Figure 3.B is shown in Figures 3.C and 3.D, but with the color indicating the distributor (Figure 3.C) or sector (Figure 3.D).

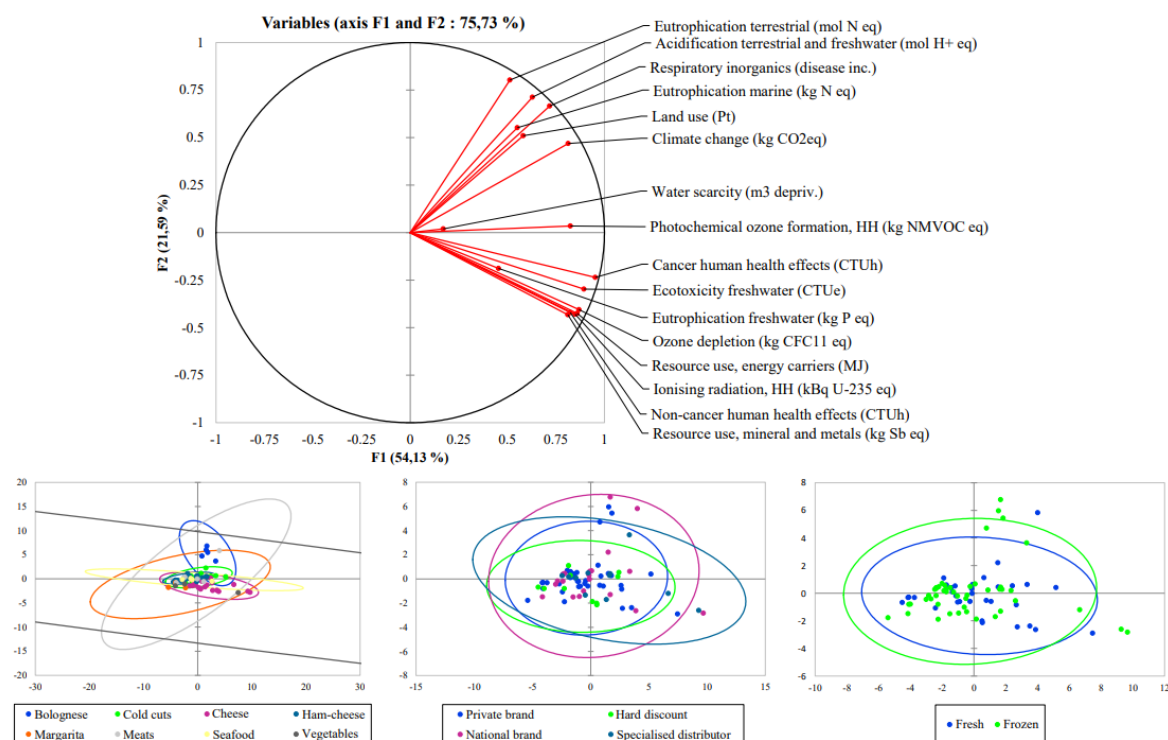


Figure 3. Principal component analysis (PCA) of the impact of the 80 pizzas on various environmental indicators (A) and scatter plots representing pizzas from different families (B), distributors (C), and sectors (D).

All environmental indicators positively correlate with each other, the correlation mainly being explained by the construction of the F1 axis, (54.13% of the variance). This result indicates the agreement between various environmental indicators, meaning that they similarly characterize the studied pizzas.

However, two groups could be distinguished along the F2 axis, although it only accounted for 21.59% of the variance (Figure 3A). The first group (located above the F1 axis) mainly includes the indicators that are the most affected by agricultural production, such as climate change, land use, marine eutrophication, terrestrial eutrophication, and acidification. The second group (located below the F1 axis) includes the indicators most affected by electrical consumption, such as ozone depletion, ionizing radiation, or resource use indicators (energy, carriers, and minerals and metals). This means that these two groups of indicators slightly discriminate between the pizzas.

4.3. Influence of differences between pizzas on their environmental impact

4.3.1. Impact according to pizza family

Additional variables (*ham-cheese*, *cheese*, *Bolognese*, *margarita*, *vegetables*, *cold cuts*, *meats*, *seafood*) were added to the PCA analysis to better visualize the impact of pizza families. The

resulting scatter plot is shown in Figure 3B. Pizzas from the *Bolognese* family are well separated from those of other families, especially the “cheese” and “seafood” families. There is no clear separation between the other families. This may be due to the various representative proportions between the families. As a consequence, certain families of pizzas are less represented than others (especially the *vegetables*, *margarita*, and *seafood* pizzas, which are among the least represented). The large confidence ellipse observed for the *vegetable* pizzas can be explained by the fact that these pizzas are poorly represented and that they can contain a large possibility of recipes.

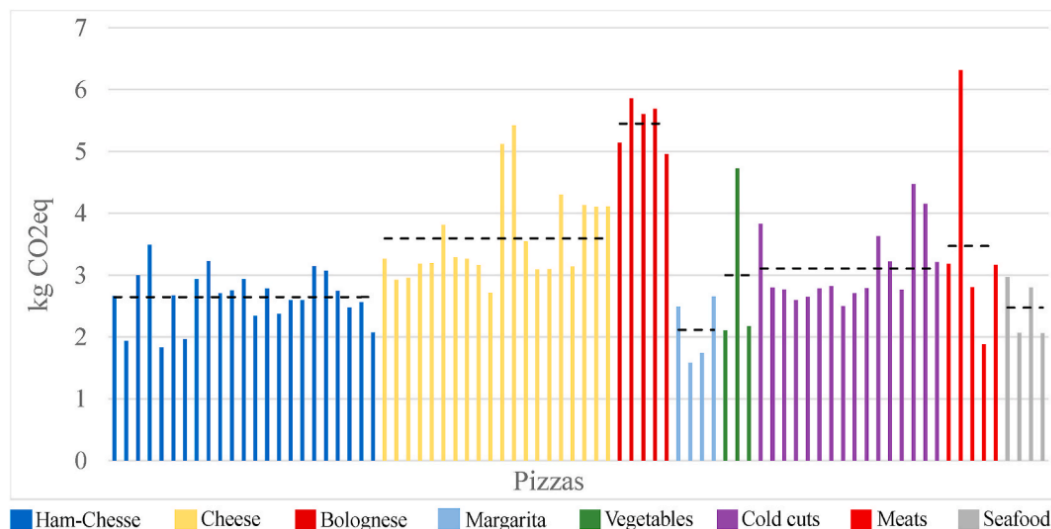


Figure 4. Impact of the 80 pizzas grouped by family on the climate change indicator ($\text{kg CO}_2\text{eq}$). The different pizza families are indicated by different colors and their average values by the dotted lines.

The *Bolognese* family and one pizza from the *meats* family had the highest values for the climate change indicator (Figure 4), due to the presence of beef. The *Bolognese* family is thus that with the highest impact on climate change ($5.45 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$ of pizza on average), as well as on the indicators particulate matter, acidification, terrestrial eutrophication, and land use. This result is consistent with that of the study conducted by Weidema et al. (2008), which showed that beef had an environmental impact up to five times higher than that of pork. In addition to pizzas containing beef, *cheese* and *vegetables* pizzas also showed a high impact on climate change (3.59 and $3.00 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$ of pizza, respectively).

Based on the average impact on climate change of each of the families studied, we established the following ranking in descending order of impact: *Bolognese* ($5.45 \text{ kgCO}_2\text{eq}$), *cheese* ($3.59 \text{ kgCO}_2\text{eq}$), *meats* ($3.47 \text{ kgCO}_2\text{eq}$), *cold cuts* ($3.10 \text{ kgCO}_2\text{eq}$), *vegetables* ($3.00 \text{ kgCO}_2\text{eq}$), *ham cheese* ($2.65 \text{ kgCO}_2\text{eq}$), *seafood* ($2.47 \text{ kgCO}_2\text{eq}$), and *margarita* ($2.11 \text{ kgCO}_2\text{eq}$). These values are slightly higher than the CO_2eq emissions values calculated by Stylianou et al. (2020): from 1.28 to $3.21 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$ of pizza vegetarian pizzas and from 4 to $5,21 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$ of pizza for meat pizzas (depending on the selected database). However, Stylianou et al. (2020) only considered the

ingredient-production step, explaining why their values are lower than ours.

Each pizza was compared to the others to establish whether the ranking based on mean values of each family was similar to the ranking of the pizzas individually. More than 20% of the pizzas were misclassified using a ranking based on average impact. The percentage of misclassified pizzas depended on the family. Indeed, only a small number of pizzas were misclassified among the pizzas at the two extremes, *Bolognese* and *margarita* pizzas, with only 1.33% (x/80) and 9.8% (x/80) misclassified. Among the other families of pizzas, the frequency of misclassification was 15% for *cheese* pizzas, 32% for *meat* pizzas, 26% for *cold cut* pizzas, 37% for *vegetable* pizzas, 21% for *ham cheese* pizzas, and 25% for *seafood* pizzas. Thus, with the exception of the *Bolognese* family for certain environmental indicators, the environmental impact of a pizza is not dependent on its family and a ranking based on pizza family is not adequate. The specificity of each recipe must be considered independently of the family to which the pizza belongs. However, currently, comparisons on the basis of the average or only one representative of the category are performed in most studies, like for mozzarella (Dalla Riva et al., 2017) or pizzas (Stylianou et al., 2020) environmental assessments for example. This may lead to inappropriate conclusions.

We performed a partial least squares regression (PLS) in which the indicator climate change was explained by the variable percentage of cheese, percentage of tomato sauce and vegetables, percentage of dough, and percentage of meat and fish to identify ingredients with a large impact on climate change (Figure 5).

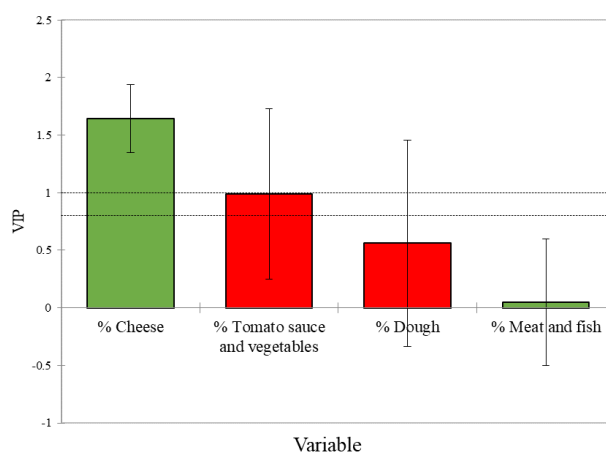


Figure 5. Importance of the variables in the projection (VIP) representing the indicator climate change explained by the amounts (%) of various types of ingredients in pizzas (green: positive correlation; red: negative correlation)

The impact of pizzas on climate change significantly correlated with the percentage of cheese, tomato sauce, and vegetables in the pizzas. The correlation was positive for the percentage of cheese (as well as the percentage of meat and fish) and negative for the percentage of tomato sauce and vegetables (as well as the percentage of dough). Thus, pizzas containing less cheese and more tomato sauce and vegetables have a globally lower impact on climate change. The

low correlation observed between the percentage of meat and fish and the impact of pizza on climate change is certainly because most pizzas do not contain meat or fish but still have a relatively high impact on climate change due to the amount of cheese. On the contrary, all the pizzas studied contain cheese in varying proportions (Figure 6). We observed a positive correlation between cheese content and the impact on climate change of the 80 pizzas ($R^2 = 0.19$).

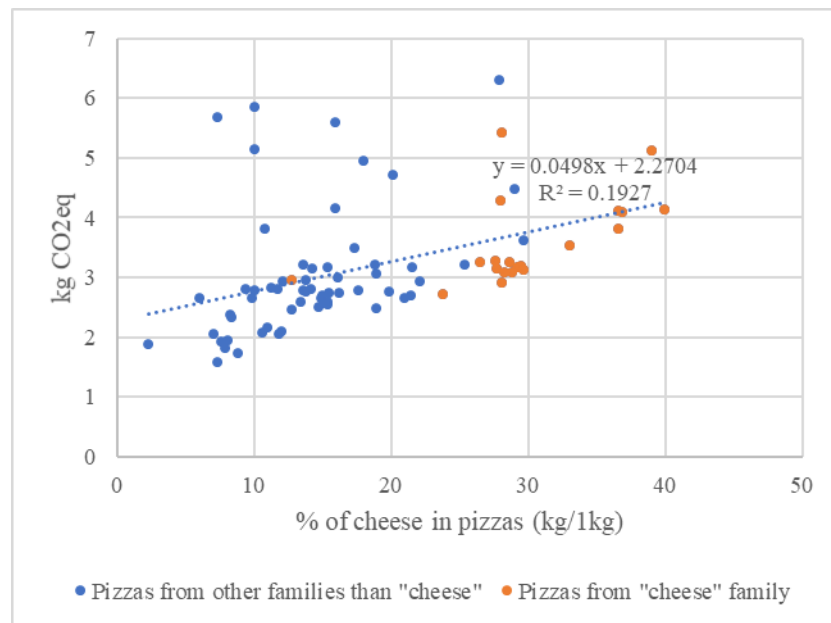


Figure 6. Increase in the impact on climate change of the 80 pizzas according to their cheese content

(in orange: pizzas from the cheese family, in blue: pizzas from other families)

Nevertheless, not all cheeses have the same impact on climate change, which can explain the variation of environmental impact between pizzas containing the same amount of cheese. For example, hard cheeses, such as Grana Padano (Bava et al., 2018), have a higher impact than soft cheeses, such as mozzarella (Dalla Riva et al., 2017). The “cheese” family shown in Figure 4 includes pizzas with a high content of cheese. Nevertheless, because not all cheeses have the same environmental impact, pizzas from the *cheese* family are not necessarily those with the highest impact on climate change. These results show that pizza recipes have a major influence on the environmental impact of pizza. Recipes can vary highly between pizzas, even between those from the same family, thus explaining why pizzas are not possible to rank solely based on their family.

4.3.2. Variability of impact according to the distributor

The various pizza distributors (national brands, private brands, hard discount, and specialized distributors) were added as additional variables to the PCA presented in Figure 3A. The

resulting scatter plot is shown in Figure 3B.

Pizzas from the same type of retailer do not appear to cluster together and are relatively homogeneously distributed around 0, regardless of the retailer. Thus, the type of distributor does not appear to have any influence on the environmental impact of pizzas. This result is not surprising because the differences in the recipes between pizzas selected in this study from the various distributors were not large, and the environmental impact of the pizzas is mainly due to the ingredients.

4.3.3. Variability of impact according to the sector

The pizza sector (fresh or frozen) was added as an additional variable to the PCA (Figure 3C). The points representing frozen pizzas are very close to those representing fresh pizzas and relatively centered around 0. Surprisingly, there appears to be no difference between fresh and frozen pizzas in terms of environmental impact. Our calculations were made based on the assumption that the storage time at the consumer's home was two days for both fresh and frozen pizzas. However, this assumption is questionable, especially as frozen pizzas can be stored for much longer. We evaluated the influence of our hypothesis of two days of home storage for both types of pizzas by studying an additional scenario consisting of a long storage scenario in which fresh pizzas are stored for seven days and frozen pizzas for one year. The LCA results obtained for these two scenarios are shown in Figure 7 for all 80 pizzas for the climate change impact category. The values obtained using the initial scenario (two-day storage) are shown by solid-colored bars and the values obtained for the long-storage scenario by unfilled black bars superimposed on the colored bars.

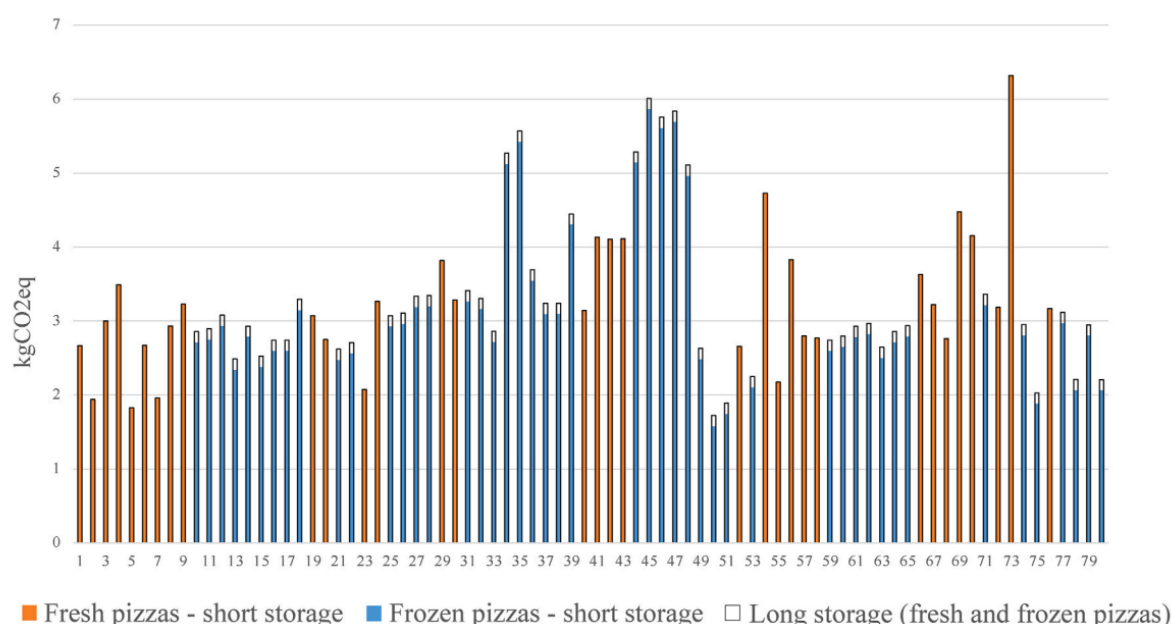


Figure 7. Impact of the 80 pizzas on climate change according to the two-day storage scenario (solid bars) versus the long-storage scenario (unfilled bars). Long storage is not visible for fresh pizzas because the values for the two scenarios are very close.

For fresh pizzas, longer storage of seven days results in an increase of $1.3 \cdot 10^{-3}$ kg CO_{2eq}/kg pizza relative to two days of storage at home. For frozen pizzas, longer storage of one year leads to an increase in emissions of $1.15 \cdot 10^{-1}$ kg CO_{2eq}/kg pizza relative to storage for two days. Long-term storage led to increases of less than 0.25% for fresh pizzas for all impact categories. However, we observed the following increases for storage of one year versus two days for frozen pizzas: 28% for ionizing radiation, 23% for fossil resource use, 15% for ozone depletion, from 1% to 5% for marine eutrophication, water use ecotoxicity, acidification, particulate matter, photochemical, human toxicity - noncancer, human toxicity – cancer, freshwater eutrophication, and climate change, and < 1% for terrestrial eutrophication, land use, and the use of mineral and metal resources. Thus, an increase in the duration of storage by a factor of 3.5 (fresh pizzas) leads to a maximum increase of 0.25% in the environmental impact of the pizza and an increase by a factor of 182.5 results in a maximum increase of 28%. Thus, the duration of storage of pizzas from both sectors (fresh and frozen) has little influence on the total environmental impact of the product.

The environmental impact related to the overall cold production to maintain the integrity of the food products has been reported to be significant; according to James and James (2010) the food cold chain is responsible for approximately 1% of CO₂ emissions worldwide. In our study, only the electrical consumption of the preservation equipment (refrigerators for fresh pizzas and freezers for frozen pizzas) was considered. Thus, it would be informative to conduct more comprehensive LCA that consider flows other than electrical consumption and, in particular, the materials used in the construction of such equipment (domestic refrigerators and freezers), as well as the management of their end of life. Moreover, we selected equipment of one size, which was the same for both refrigerators and freezers and thus not representative of the variety of sizes of refrigerators and freezers in French households. Finally, a 50% fill assumption was used for both types of equipment. However, the energy consumption of a refrigerator varies depending on how full it is (Belman-Flores et al., 2019). It would therefore also be informative to conduct an additional study to determine the variability in fullness and the average percentage of fullness of domestic freezers and refrigerators, as well as their variability in terms of size and respective average sizes to obtain values that are more representative of reality.

4.4. Link between the environmental impact of pizzas and two global nutritional indicators: energy content and the NutriScore

We studied the relationship between the environmental impact of pizzas and their nutritional content by evaluating the correlation between the impact of pizzas on various environmental indicators (the midpoint indicators and the aggregated indicator Single Score) and two global nutritional indicators (energy content (kcal) and the NutriScore). We studied these two indicators because they are both considered to represent the global nutritional quality of food products. Thus, a correlation between one of these nutritional indicators and environmental indicators would allow us to make simple recommendations for pizza formulation and

consumer choice. The correlation coefficients obtained for midpoint indicators are presented in Table 1. The point clouds representing the evolution of the Single Score as a function of the NutriScore and energy content of the pizzas are presented in Figure 8.

Table 1. Correlation coefficients between various environmental indicators and energy content (kcal) and the NutriScore

	Energy (kcal)	NutriScore
Climate change (kg CO ₂ _{eq})	0.42	0.22
Ozone depletion (kg CFC11 _{eq})	0.35	0.48
Ionizing radiation, HH (kBq U-235 _{eq})	0.28	0.39
Photochemical ozone formation, HH (kg NMVOC _{eq})	0.22	0.20
Particulate matter (disease inc.)	0.32	0.14
Human toxicity, non-cancer (CTUh)	0.24	0.40
Human toxicity, cancer (CTUh)	0.41	0.50
Acidification (mol H ⁺ _{eq})	0.32	0.13
Eutrophication, freshwater (kg P _{eq})	0.24	0.30
Eutrophication, marine (kg N _{eq})	0.39	0.23
Eutrophication, terrestrial (mol N _{eq})	0.27	0.07
Ecotoxicity freshwater (CTUe)	0.23	0.38
Land use (Pt)	0.14	-0.01
Water use (m ³ depriv.)	0.06	0.13
Resource use, fossil (MJ)	0.28	0.39
Resource use, mineral and metals (kg Sb _{eq})	0.35	0.47

There were no significant correlations between environmental indicators and energy content or the NutriScore. Nevertheless, there was a trend towards a positive overall correlation between the energy content and the NutriScore of pizzas and their environmental impact.

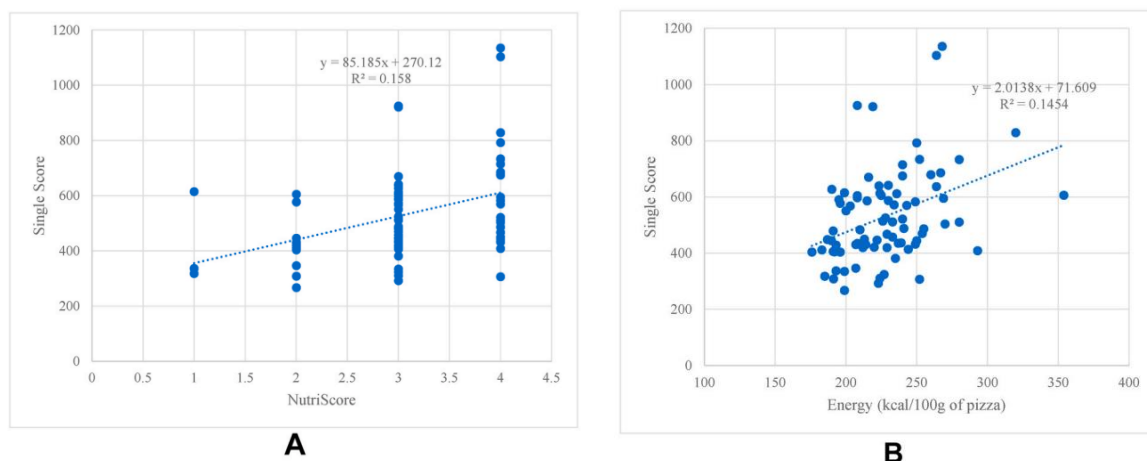


Figure 8. Graphs representing the evolution of the Single Score as a function of the NutriScore (A) and the energy content of the product (B)

Thus, that nutritional content appears to positively correlate with the impact of pizzas for almost all environmental indicators. This finding contradicts the results of Vieux et al. (2013), who showed that greenhouse gas emissions negatively correlated with the energy density of the products studied. This difference may be due to the fact that the ingredients with the highest energy density for the pizzas selected for this study are also those with the highest environmental impact (notably beef and cheese), which was not the case in the study of Vieux et al. (2013), who compared a large number of different food products. This difference could also be explained by the fact that Vieux et al. (2013) compared different items from a diet and not food products belonging to the same category. It would therefore be informative to determine which nutrients are particularly responsible for this correlation.

4.5. Link between environmental indicators and various nutritional and composition indicators

The environmental impact of pizzas appears to strongly correlate with their global nutrient content. We thus decided to study how the environmental impact of pizzas can be modeled based on their composition and nutritional quality using partial least squares (PLS) regression. The considered nutritional and compositional indicators were as follows: protein content (g/100 g), carbohydrate content, fat content (g/100 g), saturated fatty-acid content (g/100 g), sugar content (g/100 g), sodium content (g/100 g), fiber content (g/100 g), ratio of the mass of dough/mass of filling, and ratio of the mass of ingredients of animal origin/mass of ingredients of plant origin. All environmental indicators presented in Figure 3A were considered in this analysis. The results are presented in Figure 9. In such a representation, the closer an explanatory variable (here, the nutritional and composition indicators) is to a variable to be explained (here, the environmental indicators), the more the explanatory variable contributes to the variable to be explained. Thus, according to Figure 9, the environmental

indicators appear to positively correlate with the protein, fat, and saturated fatty-acid content of the pizzas. Conversely, the environmental impact of pizzas does not appear to positively correlate with the carbohydrate, sugar, or fiber content for any of the impact categories studied.

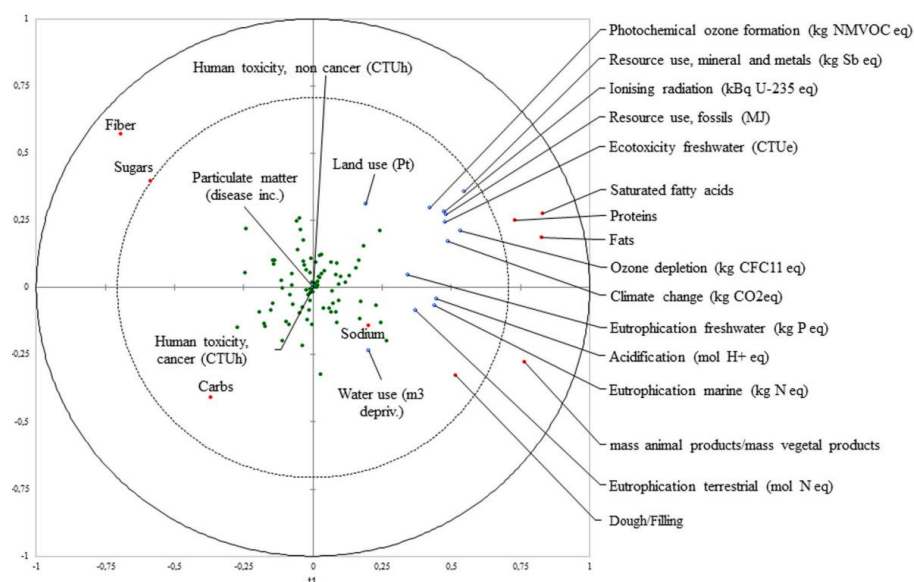


Figure 9. Partial least squares (PLS) regression considering several environmental and nutritional indicators (Q^2 Comp1 = 0.311 and Comp2 = -0.004)

For the pizzas studied, protein and fat are mainly provided by the cheese and meat ingredients they contain. Therefore, the results appear to be consistent with our findings above, as well as those of several studies that have highlighted the significant environmental impact of animal products. This is, for example, true of the study conducted by Tukker et al. (2006), who showed that the two food categories with the highest impact on the environment are the categories "meat and meat products" and "dairy products". Several studies have also shown the environmental interest of substituting animal products with plant products, such as a study conducted by Rabès et al. (2020), in which various types of diets containing varying proportions of animal products, ranging from omnivorous to vegan, were studied. This study concluded that a vegan diet containing no animal products is the diet with the lowest impact on climate change, land use, and cumulative energy demand. The literature review by Reynolds et al. (2014) also showed that reducing the consumption of meat products in favor of increasing fruit and vegetable consumption decreased the environmental impact of our diet in most cases.

4.6. Impact of substituting pizza on the scale of the total diet

Among the 80 pizzas, the one with the lowest impact on climate change emits 1.58 kg CO₂eq/kg of pizza, whereas that with the highest impact emits 6.31 kg CO₂eq/kg. We calculated the effect of substituting the pizza with the greatest impact with that with the least impact on the scale of the total diet of an average human being over one year. Thus, with a current

consumption estimated to be 10 kg of pizza/person/year in France (PIC International, 2020), the substitution of the pizza with the greatest impact on climate change with that with the least in our study would lead to a reduction of $63.1 - 15.8 = 47.3$ kgCO₂eq/person/year. As total greenhouse gas emissions are estimated to be 1,856 kgCO₂eq/person/year for a person on a conventional (non-organic) diet (Pointereau et al., 2019), such a substitution would lead to a 2.6% reduction in annual food-related greenhouse gas emissions, which is not negligible. This result is even greater if big consumers of pizzas are considered. Indeed, based on the consumption data (mean consumption and standard deviation) of “sandwiches, pizzas, pies, pastries, and salted biscuits” given by the INCA 3 study (ANSES, 2017), a coefficient of variation has been calculated. We hypothesized that the coefficient of variation calculated for the category “sandwiches, pizzas, pies, pastries, and salted biscuits” is the same for only pizzas. Once applied to the average 10 kg, we estimated that the biggest pizza consumers can eat up to 53.1 kg of pizza each year. For these consumers, the replacement of the pizza with the highest impact on climate change with that with the lowest impact would lead to a reduction of 251 kg CO₂eq/person/year, translating into a 13.5% reduction in annual food-related greenhouse gas emissions. This result shows how important the substitution of food products with those with a smaller impact from the same category can be to reduce the impact on climate change.

4.7. Recommendations in light of this study

4.7.1. Improving the reliability of environmental data on food products

Integrating detailed pizza recipes in the environmental calculation would provide a relatively representative estimate of reality and make it possible to rank pizzas with relatively high confidence. The main contributor to the environmental impact is indeed the ingredients, although pizzas vary in many characteristics: recipe, production plant (highly industrialized or not), packaging, transportation, preservation method, and shelf life at the consumers residence. Most studies related to environmental impacts of processed food products also concluded that the stage with the most environmental impacts is the agricultural production stage. For example, Bava et al. (2018) showed that milk production was the most impactful stage for the production of Grana Padano cheese. Nevertheless, when comparing products, environmental impacts are often studied for a single representative of a category independently of the possible variations in recipes existing between the different products that make up this category (Saarinen et al., 2017). The present study shows that recipe variations of pizzas had a direct influence on their environmental impacts and that not taking these recipe variations into account could lead to erroneous conclusions. Furthermore, the environmental impact of pizzas mainly correlates with their animal product content, especially beef and cheese. The consideration of these two parameters would be a minimum for a more representative environmental assessment of all pizzas. However, distinguishing industrial pizzas by their family, sector, or distributor does not provide reliable information about their true environmental impact. The importance of a detailed recipe to provide individual environmental

impact has been shown to be lower for other product categories, especially those with few ingredients, such as tomato sauce (Soler et al., 2020). Indeed, pizzas are highly complex food products that can, as shown here, vary greatly, especially in terms of their recipe, which may contain a large number of ingredients in varying proportions. However, this is not true of other food products, which are derived from the transformation of a main ingredient and for which the recipe is more homogeneous within the food category. For such products, the processing stage may be the most important for ranking them, as the variability between such products is due more in their processing than the recipe.

Concerning the processing stages, our study is based on data from data sheets and the scientific literature, resulting in similar processing between pizzas. It is likely that the environmental impact between pizzas would have varied if true flow measurements had been carried out at each of the production sites of the 80 pizzas. Such detailed processing data could moderate the importance of the recipes. Indeed, although several studies have shown that the processing stage product is only responsible for a small proportion of the total impacts of the finished product (Roy et al., 2009), improvements in the manufacturing process can significantly reduce the total environmental impacts of the product, as for wafer biscuit (Ismayana et al., 2020). Thus, it could be informative for future research to compare different production sites to see how they can affect the environmental impact of pizza.

4.7.2. Links between the nutritional and environmental performance of food

Although the fat content of the selected pizzas correlated with their overall environmental impact, the fiber, sodium, and sugar contents did not. Current French nutritional recommendations aim to promote an increase in fiber consumption and a reduction in that of sodium, sugar, and saturated fatty acids (Ministry of Solidarity and Health, 2019). The nutritional recommendations are thus not identical to those that would be made following our observations of the environmental performance of pizzas according to various impact categories. These results are quite divergent from those obtained by Kesse-Guyot et al. (2020), who showed that adapting a diet to the nutritional recommendations of the French government could significantly reduce the overall environmental impact of food. This difference may be due to the fact that these studies were not performed at the same scale; the study of Kesse-Guyot et al. (2020) focused on the total diet scale, whereas ours focused on the product scale. However, a study by Masset et al. (2014) also focused on the product scale and showed that among the 363 foods considered, those with a high environmental impact tend to have lower nutritional quality. They studied a substantial number of different food product (363) chosen to be representative of the average French diet. Thus, our results on the correlation between environment and nutrition are not generalizable to more global scales, probably because we studied a unique food category that is not representative of the overall diet. Furthermore, studies that consider average foods neglect the impact of existing diversity within the same product group. As human and environmental health are currently both of major concern, it would be useful to consider how to easily identify the best trade-offs in terms

of both nutritional and environmental performance. To do so, methods, such as that presented by Cooreman-Algoed et al. (2020), who managed to classify canteen meals according to both their nutritional and environmental values, could be useful to develop at the product scale. Such a method could help consumers to select food products with both favorable environmental and nutritional properties.

Nevertheless, our study could be useful for pizza reformulation in consideration of both environmental and nutritional dimensions. We show that the higher pizza content in cheese and beef is, the higher is the environmental impact of the pizza. Cheese is generally rich in fat and sodium. Hence, from a nutritional point of view, limiting its consumption is recommended (Ministry of Solidarity and Health, 2019). However, a detrimental effect of cheese on health has not been proven. Indeed, the opposite may be true. Cheese appears to have a neutral or even small beneficial effect on health, probably due to the probiotics it contains (Guo et al. 2017). The overconsumption of red meat, including beef, has been proven to have a negative effect on health (Wolk, 2017). Hence, lowering beef and, to a lesser extent, cheese content in pizzas could be beneficial both for the environment and health.

5. Conclusion

In conclusion, this study shows that different food products belonging to the same category can have a varying environmental impact. Most of the impact comes from the ingredients used. In the case of pizzas, we observed no effect of the sector, distributor, or family on environmental impact, with the exception of the *Bolognese* family, which has a higher impact on certain environmental indicators due to the high beef content of such pizzas. In addition, we observed that differences in the length of time the pizza is stored in the consumer's home would have only a minimal influence on the overall environmental impact of the pizza. We also show that the environmental impact of a pizza appears to positively correlate with its protein, fat, and saturated fatty-acid content for most of the environmental indicators studied. On the contrary, the fiber, sugar, and sodium content appear to have only a small influence on the environmental impact of pizza. Logically, we show that the environmental impact of a pizza positively correlates with the percentage of cheese, which contains high levels of protein, fat, and saturated fatty acids, for several environmental indicators. As pizza is a product that is highly consumed in France, the systematic substitution of pizza responsible for the most greenhouse gas emissions by that responsible for the least would lead to a decrease in greenhouse gas emissions linked to the diet of an average human being for a year by 2.6%, which is not negligible. Such results are encouraging in terms of the interest of reformulating common processed products for the overall improvement of the environmental performance of our food.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgements

The authors would like to thank Vincent Monclus, Anna Woodhouse, and Hélène Bidault for their contributions to the preliminary version of this work. The authors would also like to thank Alex Edelman & Associates for revision of the English. The authors acknowledge funding by the INRA metaprogramme DID'IT.

References

- Andersson, K., Ohlsson, T., 1999. Life cycle assessment of bread produced on different scales. *Int. J. LCA* 4, 25–40. <https://doi.org/10.1007/BF02979392>
- ANSES, 2017. Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) [Online]. Available. <https://www.vie-publique.fr/rapport/36772-etude-individuelle-nationale-des-consommations-alimentaires-3-inca-3> (Accessed 9 February 2021).
- Batlle-Bayer, L., Bala, A., Roca, M., Lemaire, E., Aldaco, R., Fullana-i-Palmer, P., 2020. Nutritional and environmental co-benefits of shifting to “Planetary Health” Spanish tapas. *Journal of Cleaner Production* 271, 122561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122561>
- Baudry, J., Pointereau, P., Seconda, L., Vidal, R., Taupier-Letage, B., Langevin, B., Allès, B., Galan, P., Hercberg, S., Amiot, M.-J., Boizot-Szantai, C., Hamza, O., Cravedi, J.-P., Debrauwer, L., Soler, L.-G., Lairon, D., Kesse-Guyot, E., 2019. 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. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqy361>
- Bava, L., Bacenetti, J., Gislon, G., Pellegrino, L., D’Incecco, P., Sandrucci, A., Tamburini, A., Fiala, M., Zucali, M., 2018. Impact assessment of traditional food manufacturing: The case of Grana Padano cheese. *Science of The Total Environment* 626, 1200–1209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.143>
- Belman-Flores, J.M., Pardo-Cely, D., G  mez-Martínez, M.A., Hernández-Pérez, I., Rodríguez-Valderrama, D.A., Heredia-Aricapa, Y., 2019. Thermal and Energy Evaluation of a Domestic Refrigerator under the Influence of the Thermal Load. *Energies* 12, 400. <https://doi.org/10.3390/en12030400>
- BEUC, The European Consumer Organisation, 2020. One bite at a time: Consumers and the transition to sustainable food. Analysis of a survey of European consumers on attitudes towards sustainable food.
- Bianchi, F.R., Moreschi, L., Gallo, M., Vesce, E., Del Borghi, A., 2021. Environmental analysis along the supply chain of dark, milk and white chocolate: a life cycle comparison. *Int. J. Life Cycle Assess.* 26, 807–821. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01817-6>
- van der Bend, D.L.M., Jansen, L., van der Velde, G., Block, V., 2020. The influence of a front of pack nutrition label on product reformulation: A ten-year evaluation of the Dutch Choice programme. *Food Chem. X* 6, 100086. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2020.100086>
- Chapa, J., Farkas, B., Bailey, R.L., Huang, J.-Y., 2020. Evaluation of environmental performance of dietary patterns in the United States considering food nutrition and satiety. *Science of The Total Environment* 722, 137672. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137672>
- Cooreman-Algoed, M., Huysveld, S., Lachat, C., Dewulf, J., 2020. How to integrate nutritional recommendations and environmental policy targets at the meal level: A university canteen example. *Sustainable Production and*

Consumption 21, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.10.004>

Cucurachi, S., Scherer, L., Guinée, J., Tukker, A., 2019. Life Cycle Assessment of Food Systems. *One Earth* 1, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.014>

Dalla Riva, A., Burek, J., Kim, D., Thoma, G., Cassandro, M., De Marchi, M., 2017. Environmental life cycle assessment of Italian mozzarella cheese: Hotspots and improvement opportunities. *J. Dairy Sci.* 100, 7933–7952. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12396>

DEFRA, 2008. Greenhouse Gas Impacts of Food Retailing (Research Project FO0405 No. Greenhouse Gas Impacts of Food Retailing), DEFRA Department for the Environment Food and Rural Affairs, London.

Desorge, M., Lacroix, A.M., Muller, L., Pernin, C., Potdevin, C., Ruffieux, B., 2017. L'étiquetage au service d'une alimentation durable: le point de vue des consommateurs. [Rapport de recherche] CLCV / INRA. 2017, 50 p. + annexes. halshs- 01537806f

Dijkman, T.J., Basset-Mens, C., Antón, A., Núñez, M., 2018. LCA of Food and Agriculture, in: Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I. (Eds.), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing, Cham, pp. 723–754.

EN ISO 14044, 2006. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines (ISO 14044:2006)

European Commission, 2019. Agriculture and the Green Deal: A healthy food system for people and planet [Online]. Available. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/agriculture-and-green-deal_en (Accessed 28 July 2021).

Espadas-Aldana, G., Vialle, C., Belaud, J.-P., Vaca-Garcia, C., Sablayrolles, C., 2019. Analysis and trends for Life Cycle Assessment of olive oil production. *Sustainable Production and Consumption* 19, 216–230. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.04.003>

Fazio, S., Castellani, V., Sala, S., Schau, E., Secchi, M., Zampori, L., Diaconu, E., 2018. Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment method. EUR 28888 EN, Eur. Comm. JRC109369, Ispra.

L'Obsoco (Observatoire Société & Consommation), 2021. Observation de la consommation responsable. Analyse détaillée.

Grant, C.A., Hicks, A.L., 2018. Comparative Life Cycle Assessment of Milk and Plant-Based Alternatives. *Environ. Eng. Sci.* 35, 1235–1247. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0233>

Guo, J., Astrup, A., Lovegrove, J.A., Gijsbers, L., Givens, D.I., Soedamah-Muthu, S.S., 2017. Milk and dairy consumption and risk of cardiovascular diseases and all-cause mortality: dose–response meta-analysis of prospective cohort studies. *Eur J Epidemiol* 32, 269–287. <https://doi.org/10.1007/s10654-017-0243-1>

Hallström, E., Bergman, K., Mifflin, K., Parker, R., Tyedmers, P., Troell, M., Ziegler, F., 2019. Combined climate and nutritional performance of seafoods. *Journal of Cleaner Production* 230, 402–411. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.229>

Houston, M., Minich, D., Sinatra, S.T., Kahn, J.K., Guarneri, M., 2018. Recent Science and Clinical Application of Nutrition to Coronary Heart Disease. *J. Am. Coll. Nutr.* 37, 169–187. <https://doi.org/10.1080/07315724.2017.1381053>

Ismayana, A., Ibrahim, O.A., Yani, M., 2020. Life cycle assessment of wafer biscuit production. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 472, 012065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/472/1/012065>

James, S.J., James, C., 2010. The food cold-chain and climate change. *Food Res. Int., Climate Change and Food Science* 43, 1944–1956. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.02.001>

Kerschbaum, E., Nuessler, V., 2019. Cancer Prevention with Nutrition and Lifestyle. *Visc. Med.* 35, 204–209. <https://doi.org/10.1159/000501776>

- Kesse-Guyot, E., Chaltiel, D., Wang, J., Pointereau, P., Langevin, B., Allès, B., Rebouillat, P., Lairon, D., Vidal, R., Mariotti, F., Egnell, M., Touvier, M., Julia, C., Baudry, J., Hercberg, S., 2020. Sustainability analysis of French dietary guidelines using multiple criteria. *Nat Sustain* 3, 377–385. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0495-8>
- Kim, D., Thoma, G., Nutter, D., Milani, F., Ulrich, R., Norris, G., 2013. Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1019–1035. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0553-9>
- Lexico, 2021. Dictionary [Online]. Available. <https://www.lexico.com/en/definition/pizza> (Accessed 23 July 2021).
- Masset, G., Soler, L.-G., Vieux, F., Darmon, N., 2014. Identifying Sustainable Foods: The Relationship between Environmental Impact, Nutritional Quality, and Prices of Foods Representative of the French Diet. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics* 114, 862–869. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2014.02.002>
- Ministry of Solidarity and Health, 2019. Programme National Nutrition Santé (PNNS) 2019-2023.
- PIC International, 2020. La croissance retrouvée du marché de la pizza - News commerce - 701 [Online]. Available. <https://www.pic-inter.com/actualites-commerce/news-commerce/la-croissance-retrouvee-du-marche-de-la-pizza-701.html> (Accessed 9 February 2021).
- Pointereau P., Baudry J., Couturier C., Kesse-Guyot E., Hamon X., Hercberg S., Luzzi H., Lairon D., Langevin B., Le Manach F., Seconda L., 2019. Le revers de notre assiette : Changer d'alimentation pour préserver notre santé et notre environnement. Solagro.
- Rabès, A., Seconda, L., Langevin, B., Allès, B., Touvier, M., Hercberg, S., Lairon, D., Baudry, J., Pointereau, P., Kesse-Guyot, E., 2020. Greenhouse gas emissions, energy demand and land use associated with omnivorous, pesco-vegetarian, vegetarian, and vegan diets accounting for farming practices. *Sustainable Production and Consumption* 22, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.02.010>
- Reynolds, C.J., Buckley, J.D., Weinstein, P., Boland, J., 2014. Are the Dietary Guidelines for Meat, Fat, Fruit and Vegetable Consumption Appropriate for Environmental Sustainability? A Review of the Literature. *Nutrients* 6, 2251–2265. <https://doi.org/10.3390/nu6062251>
- Roy, P., Nei, D., Orikasa, T., Xu, Q., Okadome, H., Nakamura, N., Shiina, T., 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering* 90, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>
- Saarinen, M., Fogelholm, M., Tahvonen, R., Kurppa, S., 2017. Taking nutrition into account within the life cycle assessment of food products. *J. Clean. Prod.* 149, 828–844. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.062>
- Saerens, W., Smetana, S., Van Campenhout, L., Lammers, V., Heinz, V., 2021. Life cycle assessment of burger patties produced with extruded meat substitutes. *Journal of Cleaner Production* 306, 127177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127177>
- Saint-Eve, A., Irlinger, F., Pénicaud, C., Souchon, I., Marette, S., 2021. Consumer preferences for new fermented food products that mix animal and plant protein sources. *Food Quality and Preference* 90, 104117. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104117>
- Shahvarooghi Farahani, S., Soheilifard, F., Ghasemi Nejad Raini, M., Kokei, D., 2019. Comparison of different tomato puree production phases from an environmental point of view. *Int. J. Life Cycle Assess.* 24, 1817–1827. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01613-x>
- Soler L.G., Van de Werf H.M.G., Muller L., Gascuel C., Colomb V., Rimbaud A., Mousset J., 2020. L'affichage environnemental des produits alimentaires: Quelles modalités, quelles données, quels usages? Document de travail.
- Stylianou, K.S., McDonald, E., Fulgoni III, V.L., Jolliet, O., 2020. Standardized Recipes and Their Influence on the Environmental Impact Assessment of Mixed Dishes: A Case Study on Pizza. *Sustainability* 12, 9466. <https://doi.org/10.3390/su12229466>
- Tukker A., Huppes G., Geerken T., Nielsen P., 2006. Environmental Impact of Products (EIPRO): Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25. Technical Report Series.

United nations, 2017. La population mondiale devrait atteindre 9,8 milliards en 2050 et 11,2 milliards en 2100, selon l'ONU [Online]. Available. <https://news.un.org/fr/story/2017/06/359662-la-population-mondiale-devrait-atteindre-98-milliards-en-2050-et-112-milliards> (Accessed 9 February 2021).

United Nations, 2020. Sustainable development GOALS [Online]. Available. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (Accessed 28 July 2021).

United Nations, 2021. Shifting to Sustainable Diets [Online]. Available. <https://www.un.org/en/academic-impact/shifting-sustainable-diets> (Accessed 26 July 2021).

Vieux, F., Soler, L.G., Touaziz, D., Darmon, N., 2013. Impact carbone et qualité nutritionnelle de l'alimentation en France [Online]. Available. <https://agriculture.gouv.fr/impact-carbone-et-qualite-nutritionnelle-de-lalimentation-en-france> (Accessed 18 February 2021).

Weidema, B.P., M. Wesnæs, J. Hermansen, T. Kristensen, and N. Halberg. 2008. In Environmental improvement potentials of meat and dairy products, eds. Eder, P. and L. Delgado. Report EUR 23491 EN, European Commission, Joint Research Centre (DG JRC), Institute for Prospective Technological Studies. Sevilla, Spain.

Wolk, A., 2017. Potential health hazards of eating red meat. *Journal of Internal Medicine* 281, 106–122. <https://doi.org/10.1111/joim.12543>

2.1.3. Implications pour la thèse

L'article 1 a permis de mettre en évidence une importante variabilité des impacts environnementaux des 80 pizzas. Cette variabilité est principalement portée par les ingrédients composant chaque pizza, les ingrédients pouvant avoir le plus d'effet étant les produits animaux, et particulièrement le bœuf et les fromages. Sans surprise, ce sont donc les pizzas les plus riches en protéines et en lipides et acides gras saturés qui ont tendance à avoir le plus d'impacts environnementaux. De plus, il a été montré que le remplacement de la pizza la plus impactante par la moins impactante pouvait avoir un réel effet bénéfique en termes d'impacts environnementaux à l'échelle d'une année pour les gros consommateurs de pizzas. Ces résultats mettent en relief l'intérêt de la prise en compte de la dimension environnementale dès l'étape de conception du produit, puisque le choix des ingrédients a une influence majeure sur les impacts environnementaux finaux. Le fait que les impacts environnementaux entre les différentes pizzas soient si différents (pouvant varier de plus d'un facteur 3 pour le changement climatique par exemple) montre également que des actions de reconception pourraient permettre de significativement réduire les impacts des pizzas les plus impactantes du marché. De plus, les pizzas les plus impactantes sur le plan environnemental peuvent présenter un intérêt sur le plan de leur teneur en protéines mais sont également riches en acides gras saturés. Ceci montre que la prise en compte simultanée de la dimension environnementale et nutritionnelle n'est pas évidente, la réduction des impacts environnementaux d'une pizza pouvant également induire une réduction de sa teneur en protéines. Cette contradiction met en relief la nécessité de pouvoir coupler les dimensions environnementale et nutritionnelle afin de concevoir des pizzas conciliant au mieux ces deux aspects.

2.2. COMPARAISON DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE 44 FROMAGES AOP ARTISANAUX ET ETUDE DU LIEN ENTRE LEUR PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE ET LEUR COMPOSITION NUTRITIONNELLE (ARTICLE 2)

2.2.1 Résumé

La production de fromage a des répercussions importantes sur l'environnement, qu'il convient de réduire. En France, il existe une grande variété de fromages, fabriqués à partir de différents laits et faisant intervenir différentes technologies fromagères. Ainsi, l'objectif de l'étude était de comprendre l'origine de la variation des impacts environnementaux entre les fromages fabriqués à partir de différents laits et faisant intervenir différentes technologies fromagères et différentes pratiques d'affinage. Pour ce faire, les impacts environnementaux de 44 fromages artisanaux français, tous produits sous des labels d'appellation d'origine protégée (AOP), ont été évalués par ACV. Les technologies fromagères ont été entièrement décrites et deux scénarios d'affinage ont été étudiés. Les résultats montrent que les différences d'impacts environnementaux entre les fromages proviennent principalement du type de lait (vache, chèvre ou brebis), de la quantité de lait nécessaire pour produire un kilogramme de fromage, de la performance énergétique de la salle d'affinage et de la durée d'affinage. Ces résultats

pourraient être utiles aux fromagers souhaitant identifier l'origine des impacts environnementaux de leurs produits et mettre en œuvre des actions efficaces pour les réduire. D'après les résultats, les innovations permettant de réduire la consommation électrique pendant l'affinage sont intéressantes à explorer afin d'améliorer la performance environnementale d'un fromage.

2.2.2 Article 2 : Explaining the Differences between the Environmental Impacts of 44 French Artisanal Cheeses.

Article publié dans **Sustainability**.

Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C., 2022. Explaining the Differences between the Environmental Impacts of 44 French Artisanal Cheeses. *Sustainability* 14, 9484. <https://doi.org/10.3390/su14159484>

Data paper associé publié dans **Data in Brief** (disponible en Annexe 2).

Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C., 2022. Data related to the Life Cycle Assessment of 44 artisanally produced French Protected Designation of Origin (PDO) cheeses. *Data Brief*, 43, 108403. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108403>.

Explaining the Differences between the Environmental Impacts of 44 French Artisanal Cheeses

Adeline Cortesi¹, Laure Dijoux¹, Gwenola Yannou-Le Bris¹ and Caroline Pénicaud¹

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

Abstract: Cheese production causes significant environmental impacts, which have to be reduced. In France, a lot of different cheeses are available, made from different milks but also from different cheese technologies. The goal of this study was to understand the origin of the environmental impact variation between cheeses made from different technologies and milks and produced using different ripening practices. To do so, the environmental impacts of 44 different types of French artisanal cheese, all produced under protected designation of origin (PDO) labels, were assessed using the life cycle assessment. Cheese technologies were fully described and two ripening scenarios were investigated. Results show that the differences of environmental impacts between cheeses mainly come from: the milk type (cow, goat, or sheep), the milk amount needed to produce one kilogram of cheese, the energetic performance of the ripening room, and the ripening time. Such results could be useful to cheesemakers to identify the origin of the environmental impacts of their products and to implement effective actions to reduce them. According to the results, innovations leading to the reduction in electrical consumption during ripening are interesting to explore in order to increase the environmental performance of a cheese.

Keywords: life cycle assessment (LCA); food industry; food product; type of milk; energy-efficient ripening room; alternative scenario

1. Introduction

Cheese is an appreciated food product, especially in the European Union, where more than 39% of total whole milk production is used for cheese [1]. In France, cheese plays an integral part in traditional culture and gastronomy; indeed, in [2] it is estimated that in 2020, the average annual cheese consumption per capita in France was 27.4 kg.

However, this consumption is not without its costs, as animal products, such as cheese, are linked with serious environmental impacts. Among the different methods used to assess

environmental impacts, the life cycle assessment (LCA) is well regarded because it evaluates the potential environmental impact associated with a product, process, or service over its entire life cycle. It is a multicriteria method of evaluation that is scientifically recognized and standardized under ISO standards 14040 to 14044 [3]. Furthermore, the European Union established a theoretical and practical framework to promote the standardization of LCA practices used for quantifying the environmental performance of products (Product Environmental Footprint Category 2 Rules Guidance, 2018; Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method, 2019). These standards form a basis for the effective comparison of multiple scenarios with regard to the scope of different evaluations and their underlying assumptions. With these advances, LCA became a method of choice in studies focusing on the agrifood sector [4].

A 2017 review examined 16 published examples of LCA conducted for different cheeses [5]. The 16 studies were carried out in different countries, but shared largely similar goals: to define the environmental “hotspots” of cheese production (using a mass-based functional unit) in order to either reduce environmental impacts or compare different production plants. When possible, the review compared the LCA results of the different studies with respect to the potential impacts on global warming, acidification, and eutrophication, divided into the following steps: raw milk production, raw milk transportation, milk processing, and cheese packaging. Across all studies, the step with the largest environmental impacts tended to be raw milk production. A similar finding was reported by [6] in his literature review of 31 published LCA of dairy products, of which 17 were for cheeses (8 of the 17 were also included in the review of [5]). Both of these literature reviews highlighted the fact that the most commonly calculated environmental impact was global warming potential, followed by eutrophication and acidification potential. Impacts of cheeses on other environmental categories were less often examined, with the result that the overall picture in the scientific literature is less clear.

The strong degree of overlap between these two reviews highlights the fact that the number of LCA performed on cheese is quite low given the extraordinary number and diversity of products in this category. In France alone, there are more than 1200 varieties of cheese [7], which differ from one to another in numerous ways, such as the milk they are made of (cow, sheep, or goat), the cheese technology used, or the ripening time. This diversity is currently not well represented in the literature. Indeed, a recent examination of 25 LCA of cheese by [8] included the same 17 studies included in the literature review of [6] as well as the 16 studies reviewed by [5] (with 8 studies included in both). Furthermore, the studies carried out to date focused on only one or a small number of cheeses, making it difficult to understand the origin of any possible variations in the environmental impacts of cheese. Moreover, the system boundaries, environmental categories assessed, and allocations used are often different from one study to another, which hampers quantitative comparisons.

For this reason, the aim of this study was to study the hotspots and compare the environmental impacts of a large number of cheeses in order to understand the origin of their differences by

investigating possible correlations between cheese characteristics and their environmental impacts. We selected French PDO cheeses as our model system because they encompass a large diversity of milk types and cheese technologies. Protected designation of origin (PDO) is a European label attributed to food products produced in a specific geographical area whose unique characteristics are reflective of time-honoured production techniques and local knowledge. As of the time of this study, 45 cheeses benefit from this quality label in France [9]. On average, PDO cheeses represent 15.8% of the total production of ripened cheeses in France [10]. These cheeses were also suited for this study because their production is highly regulated by strict and detailed specifications that could be consulted for data collection. After the cheesemaking process, cheesemakers can choose to ripen their cheeses at the production site or to ripen them off-site in a dedicated shared ripening room. These two scenarios will be analyzed in the study in order to understand how these two practices can influence the environmental impacts of cheeses.

2. Materials and Methods

For this study, we followed the four steps of life cycle assessment: goal and scope definition, life cycle inventory analysis, life cycle impact assessment (LCIA), and interpretation of results.

2.1. Goal and Scope

The goals of this study were to analyze the environmental impacts of a large sample of cheeses (44 French PDO cheeses), determine the most significant impacts associated with different cheese production processes, and better understand the links between the different characteristics of cheese and its environmental impacts.

2.1.1. Product Selection

The 44 PDO cheeses studied, as well as the technologies and types of milk used for each, are presented in Table 1.

Table 1. 44 French PDO cheeses studied.

Cheese Name	Milk Origin	Cheese Technology
Abondance	Cow (highland)	Pressed cooked cheese
Banon	Goat	Bloomy rind cheese
Beaufort	Cow (highland)	Pressed cooked cheese
Bleu d'Auvergne	Cow (highland)	Blue veined cheese
Bleu de Gex Haut-Jura	Cow (highland)	Blue veined cheese

Bleu des Causses	Cow (highland)	Blue veined cheese
Bleu du Vercors-Sassenage	Cow (highland)	Blue veined cheese
Brie de Meaux	Cow (lowland)	Bloomy rind cheese
Bries de Melun	Cow (lowland)	Bloomy rind cheese
Camembert de Normandie	Cow (lowland)	Bloomy rind cheese
Cantal	Cow (highland)	Pressed uncooked cheese
Chabichou de Poitou	Goat	Bloomy rind cheese
Chaource	Cow (lowland)	Bloomy rind cheese
Charolais	Goat	Bloomy rind cheese
Chavignol	Goat	Bloomy rind cheese
Chevrotin	Goat	Pressed uncooked cheese
Comté	Cow (highland)	Pressed cooked cheese
Epoisses	Cow (highland)	Washed rind cheese
Fourme d'Ambert	Cow (highland)	Blue veined cheese
Fourme de Montbrisson	Cow (highland)	Blue veined cheese
Laguiole	Cow (highland)	Pressed uncooked cheese
Langres	Cow (highland)	Washed rind cheese
Livarot	Cow (lowland)	Washed rind cheese
Mâconnais	Goat	Bloomy rind cheese
Maroilles	Cow (lowland)	Washed rind cheese
Mont d'Or	Cow (highland)	Washed rind cheese
Morbier	Cow (highland)	Pressed uncooked cheese
Munster	Cow (highland)	Washed rind cheese
Neufchâtel	Cow (lowland)	Bloomy rind cheese
Ossau Iraty	Sheep	Pressed uncooked cheese
Pélardon	Goat	Bloomy rind cheese
Picodon	Goat	Bloomy rind cheese
Pont l'Évêque	Cow (lowland)	Washed rind cheese
Pouligny Saint-Pierre	Goat	Bloomy rind cheese
Reblochon	Cow (highland)	Pressed uncooked cheese

Rigotte de Condrieu	Goat	Bloomy rind cheese
Rocamadour	Goat	Bloomy rind cheese
Roquefort	Sheep	Blue veined cheese
Saint-Nectaire	Cow (highland)	Pressed uncooked cheese
Sainte-Maure-de-Touraine	Goat	Bloomy rind cheese
Salers	Cow (highland)	Pressed uncooked cheese
Selles sur Cher	Goat	Bloomy rind cheese
Tome de Bauges	Cow (highland)	Pressed uncooked cheese
Valençay	Goat	Bloomy rind cheese

The only PDO cheese not included in this study, Brocciu, was excluded because it is the only PDO cheese produced from whey, and would therefore represent an outlier in the analysis.

2.1.2. System Boundaries

The steps of cheese production analyzed in this study are presented in Figure 1. Initially, we aimed to model only a base scenario of an on-site cheesemaking process in which cheeses are ripened in a small room close to the production area. However, it became clear from discussions with experts that there are major disparities in the energy usage and efficiency of ripening rooms. For this reason, we also studied an alternative scenario of cheese ripening in which cheeses are transported to a larger, more energy efficient, dedicated ripening room shared with cheeses from other producers. This ripening room is located within the authorized geographical production area of each PDO cheese. This scenario is presented as “Alternative scenario” in Figure 1 and includes the additional transportation step. Outputs of possible co-products (cream and whey) were not included within the system boundaries and therefore allocation factors were used to determine the parts of the process that were attributable to the cheese rather than its co-products.

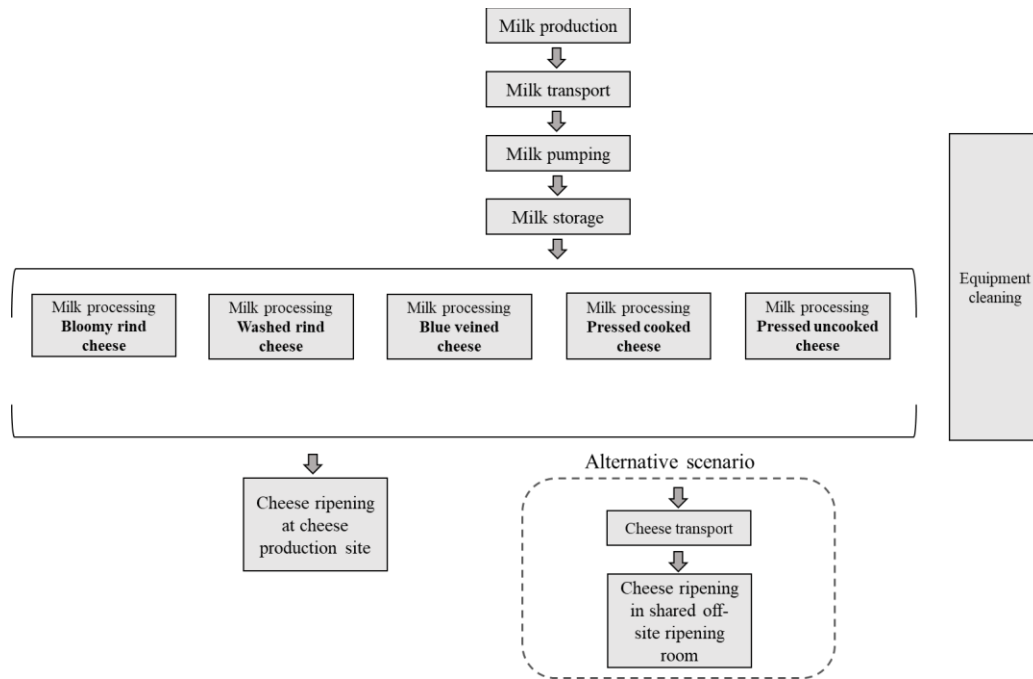


Figure 1. Steps of cheese production considered in the study

Although the different cheese technologies generally utilize the same steps, some steps of milk processing are specific to certain technologies, such as pressing, which is used for pressed cheeses (although some other cheeses may also undergo light pressing), or cooking of the curd, which is specific to cooked pressed cheeses. The milk production step includes all the processes needed to produce the milk (animal feed production, breeding, etc.). Milk pumping, storage, and processing include energy consumption, as well as the materials of some equipment. Milk and cheeses are transported in a refrigerated truck. Data related to the milks' productions were taken from the AGRIBALYSE 3.0 database, and data related to the electricity, the materials, and the transports were taken from the Ecoinvent 3.6 database. More details about the sub-steps of the cheese production process, as well as the data used for the life cycle inventory, are available in the associated data paper [11].

2.1.3. Functional Unit

The functional unit chosen for this study was 1 kg of cheese after the ripening step.

2.2. Inventory Analysis

2.2.1. Data Collection

The main flows considered here were milk, co-products (cream and whey), transport, water, energy consumption, and equipment materials (stainless steel, copper, and wood). PDO specifications were used to identify the type of milk used (highland cow milk, lowland cow milk, sheep milk, goat milk), the minimum ripening duration, the allowed materials for the vat (stainless steel or copper) and for ripening room shelving (wood or stainless steel), the maximum distance allowed for milk and/or cheese transport, and the maximum length of time

the milk could be stored before being processed. Technical datasheets and the scientific literature were consulted for estimates of water consumption in the equipment cleaning step, the electricity consumed for cheese processing, and the materials used in the production of 1 kg of cheese (using time and volume allocations). We consulted cheese experts to estimate the amount of milk needed to produce 1 kg of each cheese based on their knowledge, complemented by online data when needed. Two cheese experts provided information on their ripening rooms (power requirements of equipment, size of the room, and number of cheeses ripened at the same time), which was used to estimate the electrical consumption related to cheese ripening in the base scenario. For the alternative scenario, information was obtained from the scientific literature [12]. We made a particular effort to collect detailed data on each sub-step of each cheese processing method; the different sub-steps considered and their related flows are described in the associated data paper [11]. Data from the AGRIBALYSE 3.0 database were used to modelized highland cow milk, lowland cow milk, goat milk, and sheep milk. Data from the Ecoinvent database were used to modelize the electricity consumption as well as the equipment materials. All the data used are presented in the associated data paper [11].

2.2.2. Dry Matter Basis Allocation

As recommended by the PEF [13], allocations were performed on a dry matter basis to calculate the environmental impacts of the cheeses. To do so, the amount of co-products (whey and cream) associated with the production of 1 kg of cheese was estimated for each cheese and used to calculate dry basis allocation factors. These factors were then used to estimate the portion of environmental impacts that were attributable to the cheese only. More details related to the estimation of co-product mass and the calculation of allocation factors for each cheese are available in the associated data paper [11].

2.3. Life Cycle Impact Assessment

LCA was performed for each of the 44 cheeses using the SimaPro 9.1.0.11 software (PRé Sustainability, Amersfoort, The Netherlands). The selected characterization method was “EF 3.0 Method (adapted) V1.00/EF 3.0 normalization and weighting set” [14]. All the midpoint impact categories available in this method were calculated, and all of the results are available in the accompanying data paper [11]. In this article, we will focus only on the following 13 environmental indicators: climate change, ozone depletion, ionizing radiation, photochemical ozone formation, particulate matter, acidification, eutrophication marine, eutrophication freshwater, eutrophication terrestrial, land use, water use, resource use fossils, and resource use minerals and metals. The three remaining indicators were not included in the study since they are poorly modelled [15].

2.4. Interpretation of Results

Environmental data obtained by performing the LCA of the 44 different cheeses were analyzed with a principal component analysis (PCA) using Spearman correlations. PCA evaluates the correlations between all the variables tested and provides a visual, on which, the closer two variables are, the more positively correlated they are. Milk (kg/kg cheese), ripening time, and nutritional values (protein, fat, calcium, and salt content) were added as supplementary variables. The PCA was performed using the XLStat software version 2020, 5.1.1043 (Addinsoft, Paris, France). Data on the nutritional composition of the cheeses were obtained from the CIQUAL database, complemented by nutritional data on cheese packaging (found online) when necessary. When nutritional values could not be found for a cheese, the information from a similar cheese was used instead.

3. Results and Discussion

First, we analyzed variation in environmental impacts among the studied cheeses. Then, we determined the “hotspots” of cheese production (i.e., steps with particularly significant impacts) and established if these differ according to the characteristics of the cheeses. Finally, we examined the links between environmental impacts and cheese characteristics in greater detail.

3.1. Base Scenario—Analysis of Environmental Impacts variability, Identification of Hotspots

Our first task was to study the variability in environmental impacts among the 44 cheeses. For each environmental indicator, the impact of each cheese was calculated as a percentage of the cheese with the strongest impact (which varied depending on the indicator in question). The results are presented as a boxplot in Figure 2. The range of impacts (minimum and maximum) are represented for each indicator, as well as the average, the first and third quartiles, and the median.

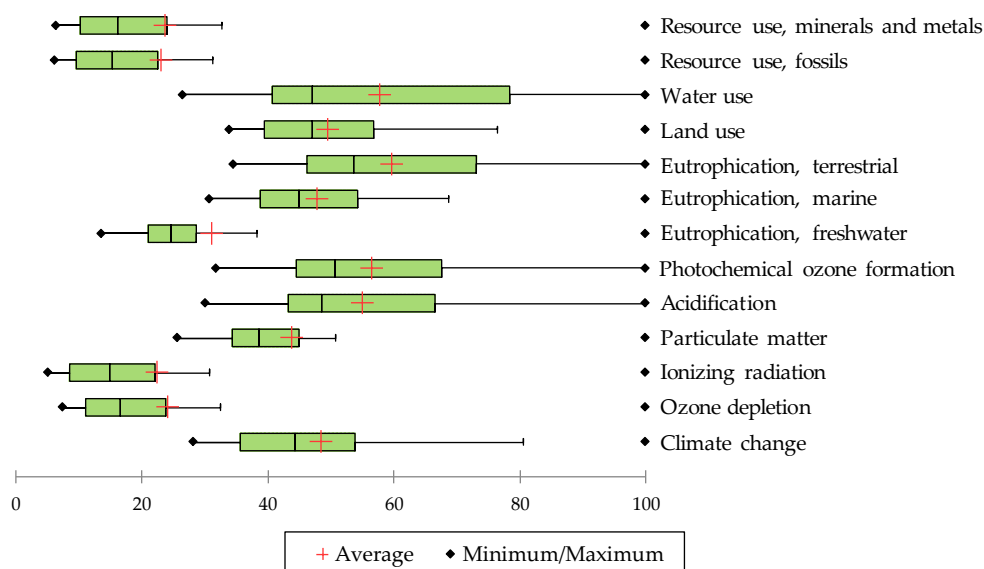


Figure 2. Variation in environmental impacts among the 44 cheeses (base scenario)

As depicted in Figure 2, there is wide variability in environmental impacts among the 44 studied cheeses. Indeed, the difference between the cheese with the highest impact and the cheese with the lowest impact ranges from 65% for terrestrial eutrophication to almost 94% for ionizing radiation. Thus, depending on the indicator in question, the cheese with the strongest impact has at least 3 times, and up to 15 times, the influence as the one with the weakest impact. However, it can be noted that for some indicators, there are extreme high values that are very different from other values, while for other indicators, the values seem to be more clustered. The indicators for which the values seem to be the most dispersed, with some values well above the others, are: ionizing radiation, ozone depletion, resource use minerals and metals, and resource use fossils.

For this reason, it would clearly be incorrect to generalize the environmental impact of one cheese to the group as a whole.

Our next task was to investigate the factors behind the observed variation. To do this, we calculated the environmental impacts of the different production steps for each studied cheese. As an example, Figure 3 shows the contribution of each production step to the overall impact of Brie de Melun for each of the 13 environmental indicators. Therefore, for each environmental indicator, the more a color is represented in the bar, the higher the contribution of the corresponding stage to the indicator. Brie de Melun was selected as an example because its ripening time and milk amount needed to make 1 kg were not the lowest nor the highest of the 44 cheeses.

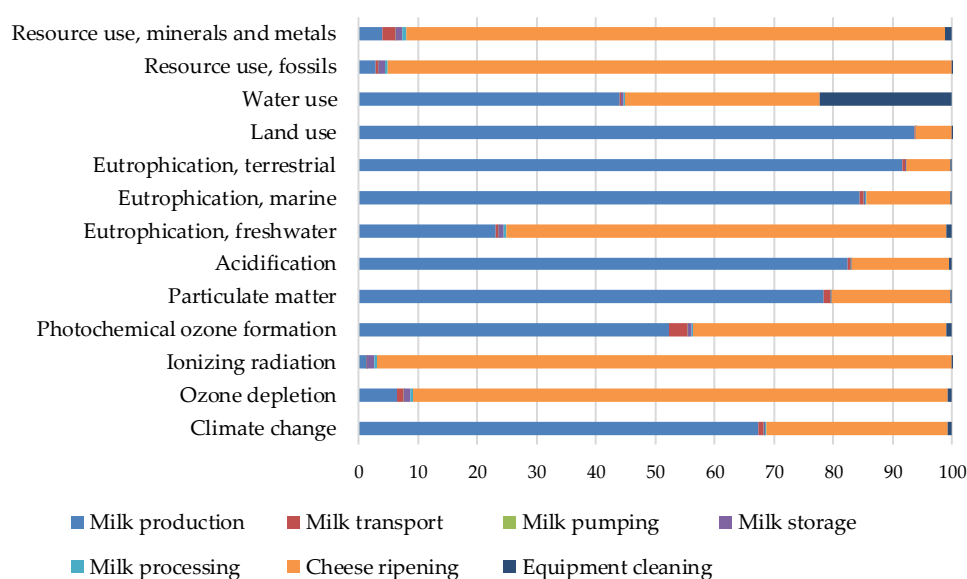


Figure 3. Contribution of each step of Brie de Melun production to several environmental indicators calculated with the EF3.0 method (base scenario)

It can be seen that two steps—milk production and cheese ripening—are responsible for the majority of the contributions in all of the studied environmental impact categories. Most other processing steps have only minor environmental impacts, with the exception of cleaning, which makes a notable contribution to overall impact on water use. However, the relative contributions of milk production and cheese ripening vary among the different cheeses and environmental indicators, as shown in Table 2.

Table 2. Maximum, minimum, and average contributions of milk production and cheese ripening steps to different environmental impact categories among the 44 cheeses (rounded to the nearest whole number).

	Contribution of Milk Production (%)			Contribution of Cheese Ripening (%)		
	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average
Climate change	90	45	78	53	7	20
Ozone depletion	37	2	15	96	52	78
Ionizing radiation	13	0.5	4	99	78	91
Photochemical ozone formation	86	30	66	68	8	28
Particulate matter	97	59	87	40	2	11
Acidification	98	65	89	35	1	9
Eutrophication, freshwater	78	9	42	90	18	54
Eutrophication, marine	97	57	87	42	2	11
Eutrophication, terrestrial	99	82	95	18	1	4
Land use	99	89	96	11	1	3
Water use	86	26	60	61	3	20
Resource use, fossils	27	1	9	98	64	86
Resource use, minerals and metals	19	1	8	97	61	81

Overall, milk production is the main contributor to the cheeses' impacts on climate change, photochemical ozone formation, particulate matter, acidification, marine eutrophication, terrestrial eutrophication, land use, and water use (Table 2). Instead, cheese ripening is the main contributor to the impacts on ozone depletion, ionizing radiation, fossil resource use fossils, and resource use minerals and metals. Therefore, it can be said that the extreme high values observed on Figure 2 for these four environmental indicators were those of cheeses ripened a long time. Indeed, most of the studied cheeses are ripened during no longer than 45 days while only five of them are ripened at least 100 days. These differences explain the gap observed on Figure 2 between the extreme values and the rest.

For eutrophication freshwater, the main contributor can be either milk production or cheese ripening depending on the cheese in question; on average, across the 44 cheeses, the contributions of the two steps are equivalent. Unsurprisingly, though, the impact of the ripening step on the eutrophication of freshwater tends to be larger for cheeses with a long ripening time than for those with a short ripening time.

The agricultural sector is the source of significant greenhouse gas emissions, originating from

both methane-producing animals and CO₂-emitting machinery [16]. It is therefore logical that the milk production step contributes strongly to the overall impact of these cheeses on climate change. Similarly, the spreading of manure and the use of nitrogen fertilizer in cultivating feed for livestock lead to eutrophication in freshwater, marine, and terrestrial environments, which explains the impact of milk production on these indicators [17]. Both livestock production and the production of livestock feed require large amounts of land [17] and significant amounts of water, which may explain why milk production is a major contributor to impacts on the land use and water use indicators. The impact of milk production on acidification can be explained by the use of nitrogen fertilizers or liquid manure to produce livestock feed; these can generate nitrogen oxides and ammonia that may induce acidification in the air or soil. Fuel combustion by farm machinery can also emit sulfur dioxide, inducing acidification [17], and generating fine particles, contributing to particulate matter.

Here, energy consumption was modelled using a French electricity mix, which is based heavily on nuclear power. The nuclear production of electricity can generate ionizing radiation [18], which explains the strong contribution of the cheese ripening step to the effect on ionizing radiation. Moreover, nuclear power production also requires the use of fossil resources [19], as well as metals (notably for the transport of electricity), which explains why the cheese ripening step plays such a large role in the cheeses' impact on both fossil and mineral/metal resource use.

Our finding that milk production contributes heavily to the environmental impacts of cheese is consistent with the literature; a 2019 review reported that raw milk production was the main factor responsible for cheese's environmental impacts [6]. In particular, the production of raw milk was responsible for, on average, 59% of abiotic resource depletion, 92% of acidification potential, 75% of ecotoxicity, 60% of energy use, 88% of eutrophication potential, 82% of global warming potential, 47% of human toxicity, 98% of land use, 39% of ozone layer depletion, 77% of photochemical ozone formation, and 96% of water depletion associated with cheese [6]. Similarly, the literature review of [5] reported that, in the production of cheese, raw milk production was responsible for between 79% and 95% of the overall impact of cheese on global warming potential, 89–99% of the impact on acidification potential, and 59–99% of the impact on eutrophication potential. As in the present study, though, it was also reported that the step of cheese production (in which the ripening step was included) could make a larger contribution to ozone layer depletion (10–80%) than raw milk production does (7–71%) [6]. On average, those authors concluded that cheese production (including ripening) accounted for 38% of abiotic resource depletion, 7% of acidification potential, 9% of ecotoxicity, 26% of energy use, 10% of eutrophication potential, 12% of global warming potential, 22% of human toxicity, 2% of land use, 38% of ozone layer depletion, 16% of photochemical ozone formation, and 4% of water depletion. In that review, the main factor behind the contribution of cheese manufacturing to each environmental impact was reported to be energy consumption. This is consistent with the results of the current study if we combine the steps of milk processing and cheese ripening, although the contribution of the cheese ripening step is higher in our study for some indicators.

For all environmental indicators, all other production steps make lower, mostly minor, contributions. Indeed, milk transport is responsible for less than 7.5% of the impact of any indicator for any cheese, with the exception of mineral and metal resource use, for which it contributes up to 14% of the impact. Milk storage accounts for less than 8% of any impact, milk processing less than 2%, and milk pumping less than 0.01%. The cleaning step makes a significant contribution to water use (from 10% to 29.5%) but has only a small effect on the other indicators (less than 4.5% for all other indicators and all cheeses). All of the LCIA results are available in the associated data paper [11].

3.2. Alternative Scenario—Analysis of Environmental Impacts Variability, Identification of Hotspots

Because the cheese ripening step makes a major contribution to the environmental impact of cheese, and because the electrical consumption attributable to this step can differ depending on the characteristics of the ripening room, we studied an alternative scenario in which the cheeses are transported off-site to a shared ripening room. This dedicated room is larger and more energy efficient (per kg of cheese) than the room modelled in the base scenario (additional information related to the ripening rooms is available in the data paper [11]). Figure 4 shows a boxplot representing the variability in environmental impacts calculated using the alternative scenario. As in Figure 2, for each environmental indicator the impact of each cheese is represented as a percentage of the cheese with the strongest impact.

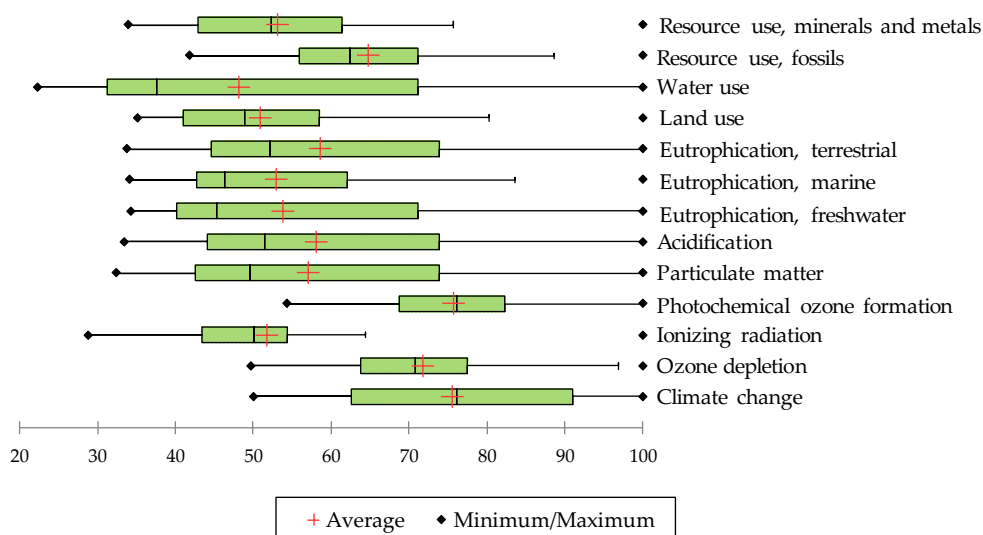


Figure 4. Variation in environmental impacts among the 44 cheeses (alternative scenario)

By comparing Figures 2 and 4, it is evident that the variability among cheeses in their environmental impacts is lower in the alternative scenario than in the base scenario. With the alternative scenario, the difference between the cheese with the highest impact and the cheese with the lowest impact ranges from 46% to almost 78% depending on the impact category,

compared with the range of 65% to 94% calculated for the base scenario. Nevertheless, for each environmental indicator, the cheese with the strongest impact still has at least two times the influence of the cheese with the lowest impact, meaning that there is still significant variability among cheeses in the environmental impacts assessed in the alternative scenario.

Figure 5 shows the contributions of the different production steps for Brie de Melun to the environmental impacts calculated with the alternative scenario.

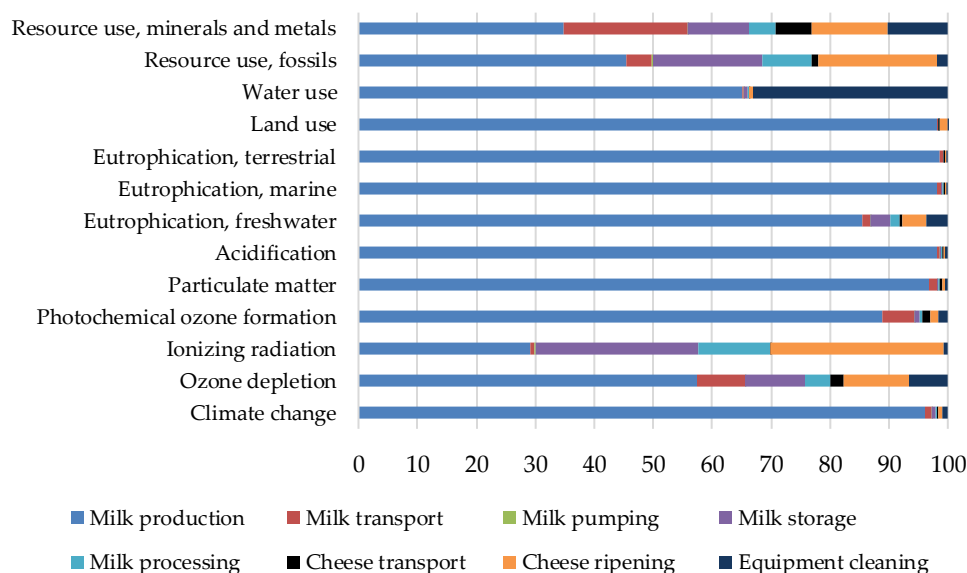


Figure 5. Contribution of each step of Brie de Melun production to several environmental impact categories calculated with the EF3.0 method (alternative scenario)

For all of the studied environmental indicators, milk production is a major contributor to the environmental impact of this cheese. This was true for the majority of cheeses, although there was some notable variation, as shown in Table 3.

Table 3. Average, minimum, and maximum contribution (percentage) of the different steps to cheeses' impacts on 13 environmental indicators (rounded to the nearest whole number)

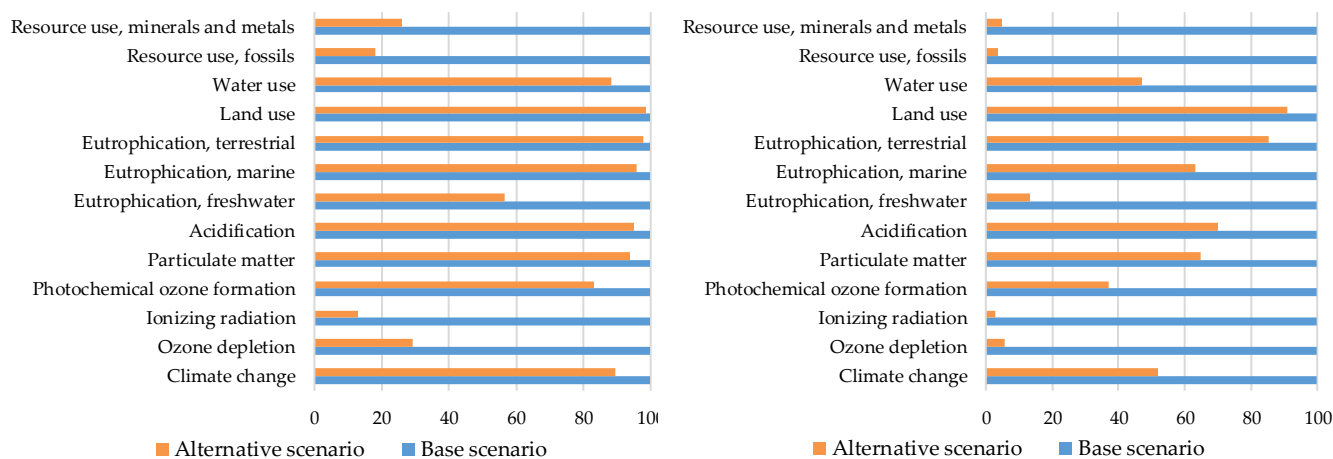
	Milk Production	Milk Transport	Milk Pumping	Milk Storage	Milk Processing	Cheese Transport	Cheese Ripening	Equipment Cleaning
Climate change	97 (94–98)	1 (0–3)	0	0 (0–1)	0	0 (0–1)	0 (0–2)	1
Ozone depletion	63 (47–77)	7 (1–22)	0	11 (0–20)	4 (0–6)	2 (0–6)	7 (2–26)	6 (4–8)
Ionizing radiation	39 (18–62)	1 (0–2)	0	31 (0–49)	10 (0–17)	0	19 (5–50)	1 (0–1)
Photochemical ozone formation	91 (96–83)	4 (1–11)	0	1 (0–2)	0 (0–1)	1 (0–3)	1 (0–3)	1 (1–2)
Particulate matter	98 (99–96)	1 (0–2)	0	0 (0–1)	0	0 (0–1)	0 (0–1)	0
Acidification	99 (99–97)	0 (0–1)	0	0 (0–1)	0	0	0 (0–1)	0 (0–1)
Eutrophication, freshwater	87 (95–77)	1 (0–5)	0	4 (0–7)	1 (0–3)	0 (0–1)	3 (0–11)	3 (2–4)
Eutrophication, marine	98 (99–95)	1 (0–3)	0	0	0	0 (0–1)	0 (0–1)	0
Eutrophication, terrestrial	99 (100–98)	0 (0–1)	0	0	0	0	0	0
Land use	99 (100–95)	0 (0–0)	0	0	0	0	0 (0–4)	0
Water use	74 (88–65)	0 (0–0)	0	1 (0–1)	0 (0–1)	0	0 (0–2)	25 (11–34)
Resource use, fossils	55 (76–32)	4 (0–11)	0	20 (0–34)	6 (0–10)	1 (0–3)	12 (2–39)	2 (1–3)
Resource use, minerals and metals	40 (53–18)	20 (4–52)	0	13 (0–22)	4 (0–7)	5 (1–14)	8 (2–28)	10 (5–14)

Under the alternative ripening scenario, the ripening step makes a much smaller contribution to all environmental indicators, but can still have a non-negligible impact on ozone depletion, ionizing radiation, fossil resource use, and mineral and metal resource use. Because the contributions of each step were calculated as percentages of the total, the reduction in the contribution from ripening necessarily induced an increase in the contributions of other electricity-dependent steps. For example, milk storage has a larger impact on ozone depletion, ionizing radiation, fossil resource use, and mineral and metal resource use in the alternative scenario than the base scenario (a contribution of 0% of the milk storage step represents the case in which the milk is not stored before being processed). Likewise, the contribution of milk transport is also larger, especially for the cheeses' impact on resource use minerals and metals and ozone depletion. The fact that the milk production is globally the main hotspot for the environmental impacts of cheeses calculated with the alternative scenario is consistent with the results obtained for other European PDO cheeses. Indeed, a study conducted on the San Simon da Costa cheese [20], a Spanish PDO cheese, concluded that 63 to 89% of the environmental impact was due to the production of cow milk, depending on the environmental

indicators. Apart from the milk production, the most impactful steps were the smoking of the cheese, the heating processes, and the waste treatment, especially because the whey produced was not valorized. Similarly, a study conducted on Grana Padano cheese [21], an Italian PDO cheese, also concluded that milk production was the main hotspot, representing from 93.5 to 99.6% of the environmental impact, depending on the indicators. Apart from the milk production, electricity consumption and transport were found to have the main contributions. The energy consumption of the ripening rooms was not specified in these two studies; neither were their capacities nor filling rates. However, the global electrical consumption of the first study was quite low, which can indicate that the electrical consumption of the ripening room is low for 1kg of cheese. Furthermore, the ripening step was reported to be negligible in the second study, but more technical information would be needed to compare their ripening systems to the ones used in the present study. However, these results show that apart from the milk production that seems to be a major environmental hotspot in all cheese LCA related studies, the contribution of the rest of the cheesemaking process can be variable due to variable practices. For example, some cheesemakers ripen their cheeses in natural ripening rooms that do not require electricity for temperature regulation, while some others use artificial ripening rooms that can be more or less energy-consuming. These differences of cheesemaking equipment and practices between cheese production sites would need to be deeper assessed in future research.

3.3. Comparative Analysis of the Base and Alternative Scenarios

To more thoroughly investigate the differences between the two scenarios, we compared the environmental impacts calculated for the base scenario to those assessed for the alternative scenario for two cheeses: one with a short ripening time (Neufchatel, ripened for 10 days) and one with a long ripening time (Comté, ripened for 120 days). Figure 6 presents the impacts of these cheeses (Neufchatel in Figure 6a and Comté in Figure 6b) in both scenarios, with the values obtained from the alternative scenario expressed as a percentage of those assessed with the base scenario.



(a)

(b)

Figure 6. Differences in the environmental impacts calculated for the base and alternative scenarios for two cheeses: Neufchatel (a) and Comté (b).

For all environmental indicators considered, the relative reduction in environmental impacts that was obtained with the alternative scenario was greater in magnitude for Comté than for Neufchatel. This pattern was evident for all studied cheeses: in general, the use of the alternative scenario reduced the environmental impacts of cheese compared to the base scenario, but this effect was much more pronounced for cheeses with a long ripening period than for those with a short ripening period. This was particularly notable for environmental indicators that are sensitive to the use of electricity, such as ozone depletion, ionizing radiation, fossil resource use, and mineral and metal resource use, and less visible in indicators that are more closely tied to the agricultural production of milk, such as climate change or land use. For example, compared to the base scenario, the alternative scenario reduced the impact on climate change by 11% for Neufchatel and 48% for Comté, while the impact on ionizing radiation was reduced by 87% for Neufchatel and 97% for Comté. These results demonstrate how ripening cheeses in a large, shared ripening room can enable a substantial reduction in the environmental impacts of the ripening step, and thus of the final cheese as well. In general, this highlights the importance of optimizing the energy efficiency of cheesemaking equipment and facilities, particularly for cheeses with a long ripening period. For example, the use of sequential air ventilation can lead to a considerable reduction in the daily energy consumption of industrial ripening rooms [12]. It is tempting to interpret these results as suggesting that the larger the scale of production, the less impact an individual product will have on the environment. However, in a comparison of the environmental impacts of artisanal and industrial cheese processing, this is not necessarily the case [22]. Indeed, it was concluded that the industrial production of Minas cheese had larger environmental impacts than artisanal production for all impact categories studied; this appeared to be due to the pasteurization step, which is used to produce this cheese in an industrial setting but not in an artisanal one. In any event, our two scenarios represent only examples and do not capture the wide diversity of existing ripening rooms. It is quite possible for a small ripening room to be energy efficient

and generate little environmental impacts, such as natural ripening rooms that require little or no energy to operate. Moreover, we should point out that, although the electrical consumption used in the alternative scenario was measured in an industrial ripening room [12], values for the base scenario were estimated based on the power of the equipment in two experimental ripening rooms and on each cheese's ripening time. This could have led us to overestimate the real electrical consumption of the ripening room used in the base scenario.

3.4. Influence of Cheese Characteristics on Environmental Impacts

Since the results presented in Section 3.1 demonstrate that milk production and cheese ripening are the two main contributors to the environmental impacts of cheese, we decided to further investigate the following characteristics: the amount of milk needed (kg/kg of cheese), milk type, and ripening time. Furthermore, we wanted to examine the influence of cheese technologies on environmental impacts as, to our knowledge, this was never studied. We also assessed possible correlations between the nutritional profiles of cheeses (fat, protein, calcium, and salt content) and their environmental impacts.

3.4.1. Base Scenario—Influence of Qualitative Characteristics of Cheeses on Their Environmental Impacts

3.4.1.1. Comparison of the Environmental Impacts of Cheeses Made from Different Types of Milk

First, we calculated the average environmental impacts of cheeses made with cow (highland), cow (lowland), and goat milk, and compared them using Kruskal–Wallis and Dunn tests (Figure 7). Sheep milk cheeses were not included here since there were only two representatives.

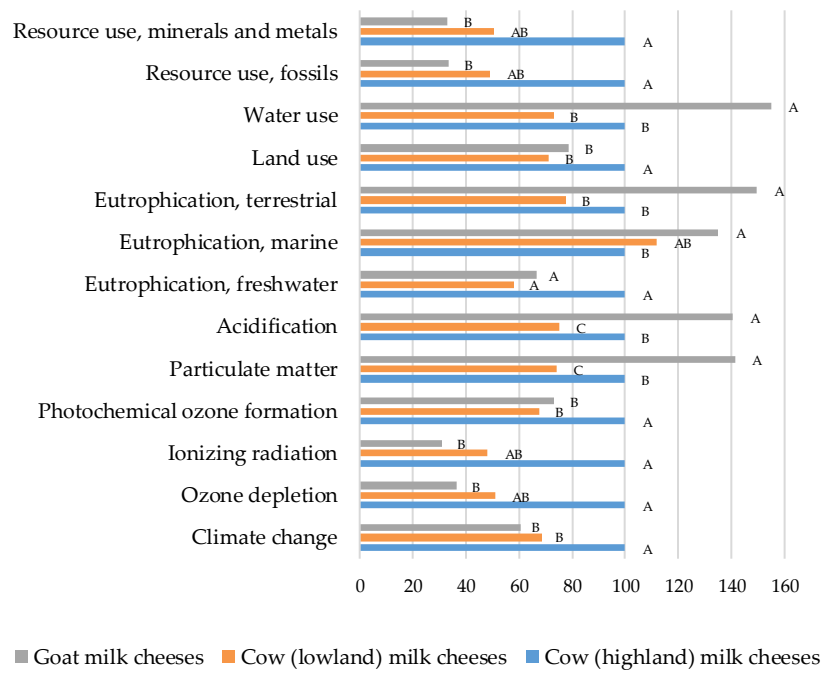


Figure 7. Comparison of the impacts of cow (highland), cow (lowland), and goat milk cheeses for 13 environmental categories. (For each environmental category, different letters indicate a significant difference)

For each impact category, different letters indicate a significant difference (p -value < 0.05) according to Kruskal–Wallis and Dunn tests.

We observed that goat milk cheeses have a higher impact than those made from cow milk on four environmental indicators: particulate matter, acidification, terrestrial eutrophication, and water use. To investigate this further, we performed a comparison of the environmental impacts of 1 kg of each type of milk, including sheep milk, which was used for the LCA (data from the AGRIBALYSE 3.0 database) (Figure 8).

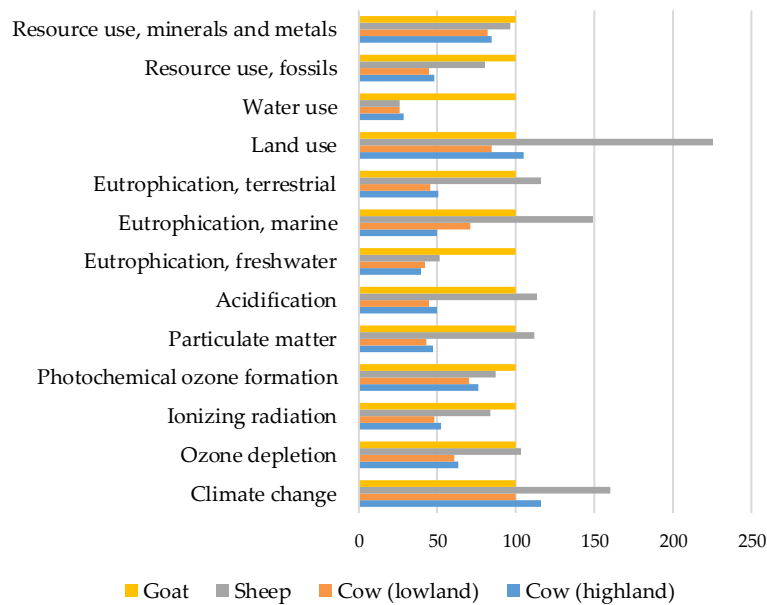


Figure 8. Comparison of the impact of cow (highland), cow (lowland) goat, and sheep milk for 13 environmental categories.

According to Figure 8, it could be said that overall, sheep milk and goat milk have higher impacts than cow milk on 11 of the 13 studied environmental indicators. Goat milk also has a much higher impact on water use than other types of milk. Interestingly, even though goat milk cheeses require less milk (kg milk/kg of cheese) and less ripening time than cow (highland) milk cheeses, they still have a higher impact on particulate matter, acidification, freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial eutrophication, and water use. It thus appears that the impacts of cheese on these environmental indicators are most strongly influenced by the type of milk used. Instead, the impacts on ozone depletion, ionizing radiation, photochemical ozone formation, fossil resource use, and mineral and metal resource use are higher for cow milk cheeses than for goat milk cheeses, even though goat milk has a higher impact on these indicators than cow milk. For these environmental indicators, then, the type of milk does not seem to be the main factor underlying the impacts of cheese. However, in this study we used the data available in the AGRIBALYSE 3.0. database to modelize the productions of highland cow, lowland cow, goat, and sheep milks. Unfortunately, the number of data available was low and therefore not all the milk production systems used for the 44 PDO cheeses production were available, which is a limitation of the study. Therefore, it would be interesting to conduct studies specific to all the milk production systems used for each PDO French cheese, especially for goat and sheep milk production, for which less data are currently available than for cow milk production. As the agricultural milk production is a major hotspot, it is predictable that the variation in farming practices can have an important influence on the LCA results.

3.4.1.2. Comparison of the Environmental Impact of Cheeses Made Using Different Cheese Technologies

The average environmental impacts of cheeses made using different technologies were calculated and compared (Figure 9). Pressed cooked cheeses were included in the analysis even though there were only three representatives. The significance of the differences among groups was tested using a Kruskal–Wallis and a Dunn test.

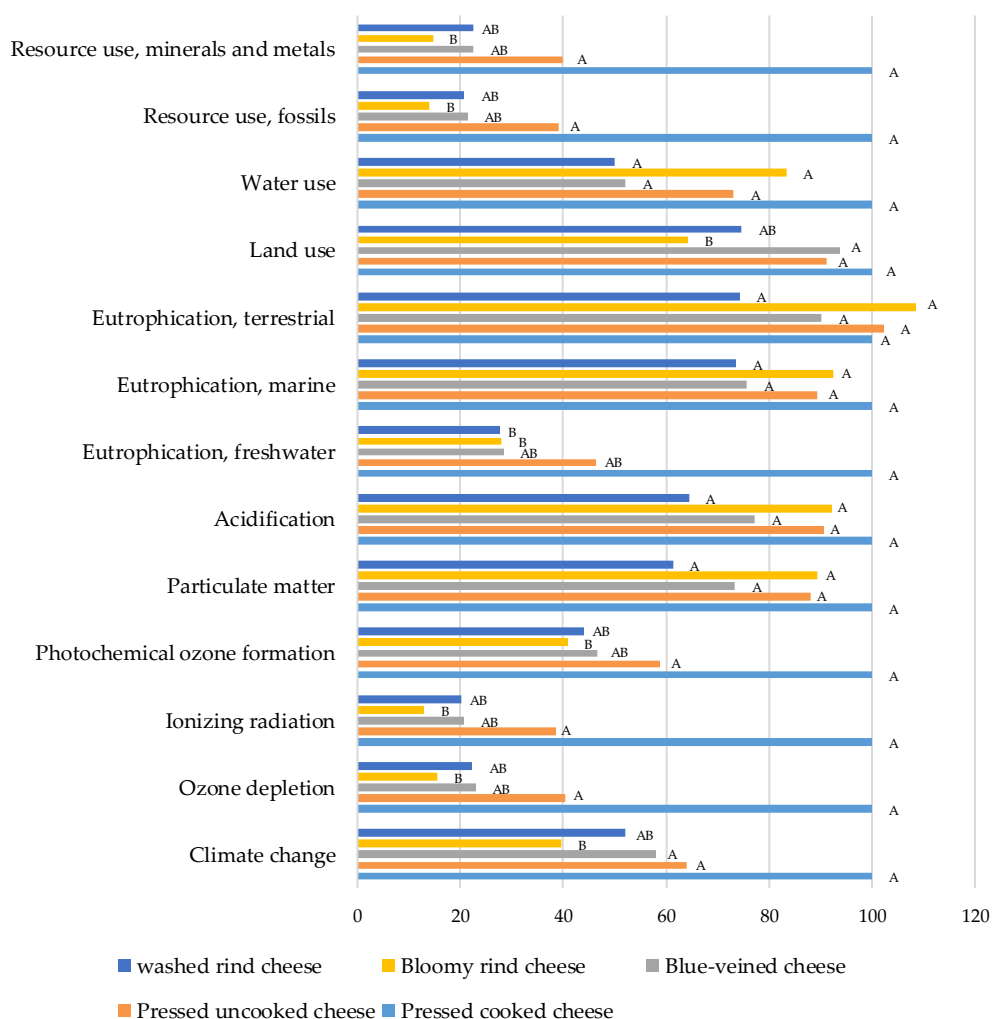


Figure 9. Comparison of the average environmental impacts of cheese according to the technologies used for production. (For each environmental category, different letters indicate a significant difference)

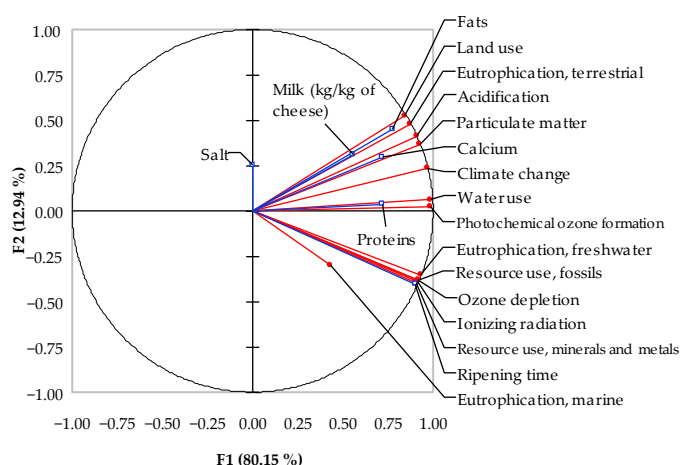
For each impact category, different letters for bars indicate a significant difference (p -value < 0.05) according to Kruskal–Wallis and Dunn tests.

For 6 of the 13 studied environmental indicators, bloomy rind cheeses have significantly lower environmental impacts than pressed cooked and pressed uncooked cheeses. In most other cases, the differences between cheese categories are not significant. Because milk processing

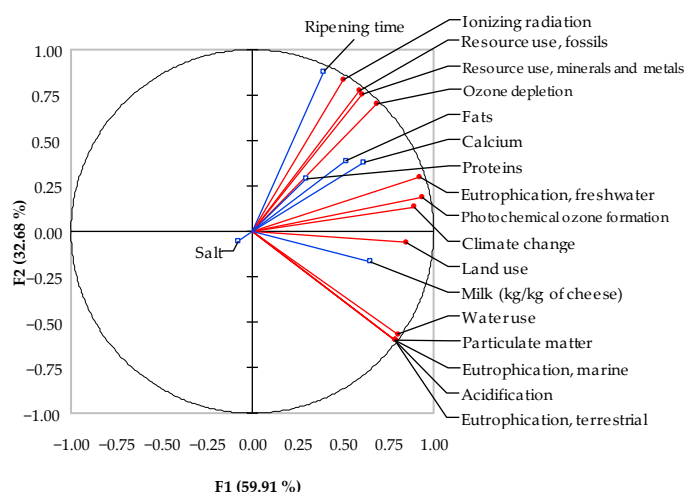
makes only a small contribution to the environmental impacts of cheeses according to Figure 3, it is probable that the differences observed on Figure 9 originate from differences in the main contributing factors: milk and/or ripening time.

3.4.2. Base Scenario—Influence of Quantitative Cheese Characteristics on Their Environmental Impacts

To better understand the origin of the variation in environmental impacts among cheeses, we used PCA (Spearman correlation) to study the relationships between the environmental impacts of cheese and certain quantitative characteristics. Environmental impact categories were used as active variables while milk amount (milk (kg/kg of cheese)), ripening time, and protein, fat, calcium, and salt content were added as supplementary variables. Because the type of milk seemed to have an important influence on several environmental categories, two PCAs were performed: one for cow (highland and lowland) milk cheeses (Figure 10a) and one for goat milk cheeses (Figure 10b).



(a)



(b)

Figure 10. PCA of the environmental impacts of the 44 cheeses on 13 different impact categories (active variables, closed red circles) and cheese characteristics (supplementary variables, open blue squares) for cow milk cheese (a) and goat milk cheese (b).

In representations of PCAs, the spatial relationship between variables depicts the correlation between them. Globally, in both scenarios, a cheese's impact on resource use fossils, resource use minerals and metals, ionizing radiation, and ozone depletion is strongly positively correlated to its ripening time. These results are consistent with our finding that the main contributor to a cheese's impact on these categories is the ripening step (Section 3.2). Instead, the impacts on land use, terrestrial eutrophication, marine eutrophication, and acidification tend to be more positively correlated to the amount of milk used than to the ripening time. This is in agreement with our observation that milk production is the main contributor to

cheeses' impacts on these environmental indicators. The two most obvious means of reducing the environmental impacts of cheese would therefore be reducing the amount of milk used and shortening the ripening time. Regarding the nutritional content, salt did not appear to be correlated with the environmental impacts of cheese, while, globally, amounts of proteins, fat, and calcium tended to be positively correlated with several environmental indicators (although the correlations were more significant for cow milk cheeses than for goat milk cheeses). In other words, the higher the protein and calcium content of a cheese, the more likely it is to have significant environmental impacts. This is logical since the cheeses with the highest amounts of these nutrients tend to be the ones that use the highest amount of milk and that have the longest ripening times. However, PDO cheeses have mandatory composition values to respect, and therefore the milk amount used to make one kilogram of cheese could not be modified. It can therefore be difficult for cheese consumers to identify the best compromise between interesting amounts of proteins and calcium and reduced environmental impact between the available cheeses of the retail market.

3.4.3. Alternative Scenario—Influence of Cheese Characteristics on Environmental Impacts under the Alternative Scenario

In the alternative scenario, ripening time has less of an influence on the environmental impacts of cheese, and milk type has more. As a result, goat milk cheeses—which under the base scenario had lower environmental impacts than cow (highland) milk cheeses on ozone depletion, ionizing radiation, photochemical ozone formation, and fossil resource use (Figure 6)—now have a stronger impact on these indicators (Figure 11).

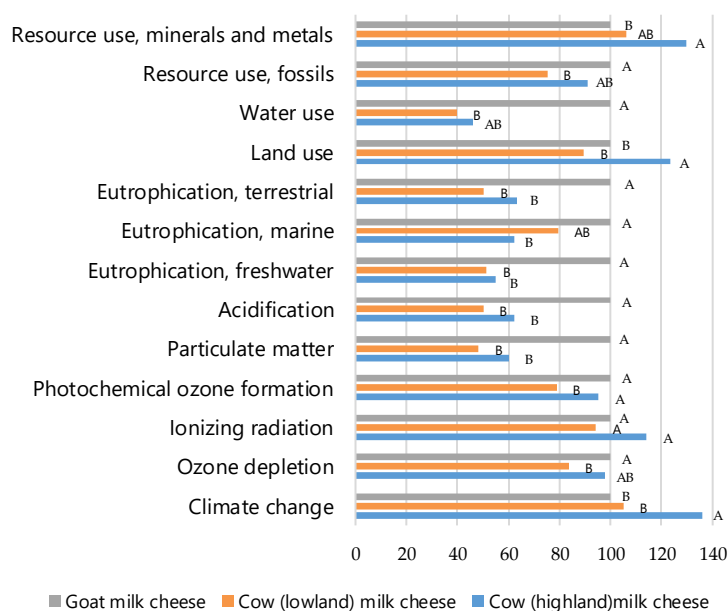


Figure 11. Comparison of the impacts of cow (highland), cow (lowland), and goat milk cheeses on 13 environmental categories. (For each environmental category, two different letters mean significant difference)

For each impact category, different letters indicate a significant difference among bars (p -value < 0.05) according to Kruskal–Wallis and Dunn tests.

The correlations between the environmental impacts of cheeses and their ripening time and milk amount were also tested for each milk type. As expected, the correlations between environmental impacts and milk amount increased in the alternative scenario compared to the base scenario, while those between environmental impacts and ripening time decreased. In the alternative scenario, milk type and milk amount are the two factors with the most influence on the environmental impacts of cheese. This is consistent with the fact that, in the alternative scenario, milk production is the main contributor to all studied environmental indicators (Section 3.2).

4. Conclusions

Our results demonstrate that, although the environmental impacts of cheese differ greatly among the 44 French PDO cheeses studied here, two production steps were consistently highlighted as the main “hotspots”: milk production and cheese ripening. For all of the indicators examined, one of these two steps was responsible for the majority of the environmental impact. However, under an alternative scenario with a reduced daily electrical consumption (per kg of cheese), the contribution of the ripening step was decreased and milk production became the main contributor to the global environmental impacts. Moreover, reducing the daily energy consumption needed for the ripening of one kilogram of cheese reduced the impacts for all 13 environmental indicators, particularly for long-ripened cheeses and for the indicators that are most sensitive to electricity consumption. It is thus clear that optimizing the energy efficiency of ripening rooms could serve as an important means of reducing the environmental impacts of cheese. Another interesting finding was that the type of milk used for a cheese has a strong effect on its environmental impacts, especially under the alternative scenario in which the impact of cheese ripening is reduced. Finally, among cheeses made from the same type of milk, certain environmental impacts were more closely correlated to the amount of milk used, while others—those that were most sensitive to electricity consumption—were strongly correlated to the ripening time; again, though this latter relationship was much weaker in the alternative scenario. Efforts to reduce the environmental impacts of cheese could therefore also target the amount of milk used, as well as the length of the ripening period (particularly if the daily energy consumption of the ripening room is high). These results could be useful to cheesemakers who are searching for ways to reduce the environmental impact of production. However, since PDO cheeses are subject to strict specifications, changes may be difficult to implement. Nevertheless, these results can serve as inspiration for improvements in processes and recipes that are not specified under the PDO scheme. Any changes implemented should also take into account nutritional characteristics to avoid improving the environmental qualities of a cheese at the expense of its nutritional quality.

These results can also be of interest to support the fact that the differences of a cheese's environmental impacts should be represented in environmental labeling of food products. This would allow cheese consumers to make more sustainable choices. However, as discussed in the study, the environmental impacts of cheeses depend on the farming as well as the cheesemaking practices.

The main limitation of this study is a lack of specific data (consumptions and emissions) related to the agricultural and cheesemaking practices for each PDO cheese production. Furthermore, only two ripening scenarios were investigated, which is few compared to the wide diversity of ripening practices and existing equipment.

Therefore, in the future, research that incorporates more of the existing differences in cheesemaking plants and equipment may help to improve the knowledge regarding environmental impact differences between cheeses and to identify options for reducing them. According to the results of this study, using a shared ripening room can be an interesting option for reducing the environmental impacts linked to the ripening step. This could be implemented especially when different cheesemakers of the same cheese are located in the same geographical area, which is the case for PDO cheeses. Financial grants from the government can also help cheesemakers to invest in less energy-consuming equipment.

Finally, since the agricultural milk production seems to be the main contributor to the global environmental impacts of the cheeses, a special attention should be paid to the practices of the milk producers. In order to better understand the influence of the different agricultural practices, further research is needed, especially for French goat and sheep milk production. This would allow cheesemakers to make more sustainable choices when choosing their milk supplier.

Author Contributions: Conceptualization, C.P.; methodology, A.C., L.D., G.Y.-L.B., C.P.; formal analysis, A.C., L.D., G.Y.-L.B., C.P.; investigation, A.C., L.D.; writing—original draft preparation, A.C.; writing—review and editing, L.D., G.Y.-L.B., C.P.; supervision, C.P.; project administration, C.P.; funding acquisition, C.P. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by the French National Research Agency through the DataSusFood project, grant number ANR-19-DATA-0016.

Institutional Review Board Statement:

Informed Consent Statement:

Data Availability Statement: The data are available in the data paper [11].

Acknowledgments: The authors would like to thank Marie-Noëlle Leclercq-Perlat, Bruno Perret, and Gilles Garric for their help and English services for scientists for professional revision of the English.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript; or in the decision to publish the results.

References

1. Milk and Milk Product Statistics. Available online: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Milk_and_milk_product_statistics#Milk_products (accessed on 28 July 2021).
2. L'économie Laitière en Chiffres—Edition 2022. Available online: <https://presse.filiere-laitiere.fr/assets/leconomie-laitiere-en-chiffres-edition-2022-f33b-ef05e.html?lang=fr> (accessed on 22 July 2022).
3. *EN ISO 14044:2006*; Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines. ISO: Geneva, Switzerland, 2006.
4. Cucurachi, S.; Scherer, L.; Guinée, J.; Tukker, A. Life Cycle Assessment of Food Systems. *One Earth* **2019**, *1*, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.014>.
5. Finnegan, W.; Yan, M.; Holden, N.M.; Goggins, J. A Review of Environmental Life Cycle Assessment Studies Examining Cheese Production. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2018**, *23*, 1773–1787. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1407-7>.
6. Üçtuğ, F.G. The Environmental Life Cycle Assessment of Dairy Products. *Food Eng. Rev.* **2019**, *11*, 104–121. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-9187-4>.
7. La France: Pays des Fromages par Excellence! Available online: <https://www.filiere-laitiere.fr/fr/fromages> (accessed on 14 November 2021).
8. Soares, B.B.; Alves, E.C.; de Almeida Neto, J.A.; Rodrigues, L.B. Chapter 8—Environmental Impact of Cheese Production. In *Environmental Impact of Agro-Food Industry and Food Consumption*; Galanakis, C.M., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2021; pp. 169–187, ISBN 978-0-12-821363-6.
9. Appellation D'origine Protégée/Contrôlée (AOP/AOC). Available online: <https://www.inao.gouv.fr/Les-signes-officiels-de-la-qualite-et-de-l-origine-SIQQ/Appellation-d-origine-protegee-controlee-AOP-AOC> (accessed on 28 April 2021).
10. Chiffres Clés 2020 des Produits Laitiers AOP et IGP. Available online: https://www.inao.gouv.fr/eng/content/download/3919/34426/version/1/file/Cnaol%20Chiffres%20Cles%202020_BD%20%28002%29.pdf (accessed on 14 January 2021).
11. Cortesi, A.; Dijoux, L.; Yannou-Le Bris, G.; Pénicaut, C. Data related to the Life Cycle Assessment of 44 artisanally produced French Protected Designation of Origin (PDO) cheeses. *Data Brief* **2022**, *43*, 108403. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108403>.
12. Corrieu, G.; Perret, B.; Kakouri, A.; Pappas, D.; Samelis, J. Positive Effects of Sequential Air Ventilation on Cooked Hard Graviera Cheese Ripening in an Industrial Ripening Room. *J. Food Eng.* **2018**, *222*, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.021>.
13. Product Environmental Footprint Category Rules for Dairy Products. Available online: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR-DairyProducts_2018-04-25_V1.pdf (Accessed on 26 February 2022).
14. Fazio, S.; Castellani, V.; Sala, S.; Schau, E.; Secchi, M.; Zampori, L.; Diaconu, E. Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment method. Ispra: Lombardy, Italy, 2018; p. 42.
15. Sala, S.; Cerutti, A.K.; Pant, R. *Development of a Weighting Approach for the Environmental Footprint (No. EUR 28562)*; Publications Office of the European Union: Luxembourg, 2018; p. 146.
16. Dollé, J.-B.; Agabriel, J.; Peyraud, J.L.; Faverdin, P.; Manneville, V.; Raison, C.; Gac, A.; Le Gall, A. Greenhouse Gases in Cattle Breeding: Evaluation and Mitigation Strategies [Les Gaz à Effet de Serre En Élevage Bovin: Évaluation et Leviers d'action]. *Prod. Anim.* **2011**, *24*, 415–432. <https://doi.org/10.20870/productions-animales.2011.24.5.3275>.

17. Le Moal, M.; Gascuel-Oudou, C.; Ménesguen, A.; Souchon, Y.; Étrillard, C.; Levain, A.; Moatar, F.; Pannard, A.; Souchu, P.; Lefebvre, A.; et al. Eutrophication: A New Wine in an Old Bottle? *Sci. Total Environ.* **2019**, *651*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>.
18. Frischknecht, R.; Braunschweig, A.; Hofstetter, P.; Suter, P. Human Health Damages Due to Ionising Radiation in Life Cycle Impact Assessment. *Environ. Impact Assess. Rev.* **2000**, *20*, 159–189. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00042-6).
19. Poinssot, C.; Bourg, S.; Ouvrier, N.; Combernoux, N.; Rostaing, C.; Vargas-Gonzalez, M.; Bruno, J. Assessment of the Environmental Footprint of Nuclear Energy Systems. Comparison between Closed and Open Fuel Cycles. *Energy* **2014**, *69*, 199–211. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.069>.
20. González-García, S.; Hospido, A.; Moreira, M.T.; Feijoo, G.; Arroja, L. Environmental Life Cycle Assessment of a Galician cheese: San Simon da Costa. *J. Clean. Prod.* **2013**, *52*, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.006>.
21. Bava, L.; Bacenetti, J.; Gislón, G.; Pellegrino, L.; D’Incecco, P.; Sandrucci, A.; Tamburini, A.; Fiala, M.; Zucali, M. Impact assessment of traditional food manufacturing: The case of Grana Padano cheese. *Sci. Total Environ.* **2018**, *626*, 1200–1209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.143>.
22. Nigri, E.M.; de Barros, A.C.; Rocha, S.D.F.; Romeiro Filho, E. Assessing Environmental Impacts Using a Comparative LCA of Industrial and Artisanal Production Processes: “Minas Cheese” Case. *Food Sci. Technol.* **2014**, *34*, 522–531. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.6356>.

2.2.3 Implications pour la thèse

De même que cela fût le cas pour l'article 1, l'article 2 a mis en évidence une importante variabilité des impacts environnementaux pouvant exister entre les 44 fromages étudiés. Cette variabilité peut avoir deux principales origines selon les indicateurs environnementaux : d'une part, le lait utilisé (quantité et origine) et d'autre part, l'affinage (type de cave et durée d'affinage). Similairement à ce qui a pu être observé pour le cas des pizzas, les fromages les plus néfastes d'un point de vue environnemental ont tendance à également être les plus riches en protéines et en matière grasse, mais également en calcium. Il y a donc, ici aussi, une contradiction entre la performance environnementale et nutritionnelle pouvant poser problème lors d'actions de reconception. De plus, contrairement aux pizzas, les fromages AOP sont régis par un cahier des charges strict rendant les actions de reconception difficiles, voire impossibles. Dans ce cas précis, les actions visant à améliorer la performance environnementale des fromages devront principalement porter sur l'amélioration de la performance énergétique du matériel utilisé.

2.3. CONCLUSION DU CHAPITRE 2

L'étude de ces deux catégories de produits a permis de montrer, qu'aussi bien pour un produit issu de la transformation d'un ingrédient principal (fromages) que pour un produit issu de l'assemblage de nombreux ingrédients (pizzas), les impacts environnementaux peuvent être variables au sein même de la catégorie et qu'il serait donc incorrect de considérer que l'ensemble des produits d'une catégorie a une performance environnementale similaire. De plus, même en subdivisant la catégorie pizzas en familles proches du point de vue des ingrédients utilisés (ex : pizzas jambon-fromages), la variabilité reste importante. Ces résultats permettent de valider l'hypothèse de départ selon laquelle la variabilité des impacts environnementaux intra-catégorie est suffisamment importante pour permettre des actions d'écoconception efficaces. Il semble ainsi important que des actions d'écoconception soient menées à l'échelle du produit et pas uniquement à l'échelle de la catégorie de produits.

De plus, dans les deux cas, des leviers d'amélioration de la qualité environnementale des produits ont pu être mis en évidence et, dans les deux cas, le choix et la quantité d'ingrédients utilisés semblent être des leviers particulièrement importants. Ceci peut rendre difficile la reconception de ces produits en vue d'une amélioration de la performance environnementale. D'une part, comme nous l'avons vu pour les fromages, certains produits sont régis par un contexte réglementaire. D'autre part, une réduction des impacts environnementaux des produits alimentaires via une action sur les ingrédients semble impliquer une possible réduction de la teneur du produit en protéines, nutriment important. A l'issue de ce chapitre, on peut donc dire que les objectifs de reformulation visant à améliorer, d'une part la qualité environnementale et d'autre part la qualité nutritionnelle, peuvent s'avérer contradictoires. Ceci met en relief la nécessité de coupler ces deux dimensions afin de concevoir des produits aux

performances environnementales et nutritionnelles satisfaisantes. Néanmoins, la qualité nutritionnelle d'un produit alimentaire n'est pas l'unique dimension d'intérêt à coupler à la dimension environnementale. Il serait donc intéressant d'étudier les liens existants entre la dimension environnementale et d'autres dimensions de qualité, telle que la qualité sensorielle par exemple.

CHAPITRE 3 : INFLUENCE DE LA VARIABILITE DES PRATIQUES DES CONSOMMATEURS A DOMICILE SUR L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL D'UN PRODUIT ALIMENTAIRE ET SUR LES PERCEPTIONS DES CONSOMMATEURS VIS-A-VIS DE CE PRODUIT (ARTICLE 3)

L'étude présentée au sein de l'article 1 a montré que la variabilité d'impacts environnementaux existant entre différentes pizzas était principalement liée aux ingrédients utilisés. Néanmoins, comme dans la grande majorité des études dédiées à l'ACV de produits alimentaires, la variabilité des pratiques des consommateurs suite à l'achat du produit au supermarché n'a pas été prise en compte. De manière générale, l'étape d'utilisation des produits alimentaires est une étape peu étudiée et donc peu documentée de l'ACV, pouvant aboutir à une sous-estimation de son influence sur les impacts environnementaux totaux des produits. Or, il semble important de pouvoir estimer les impacts environnementaux possibles pouvant être générés lors de la phase d'usage du produit afin de les prendre en compte dès la phase de conception. Pour ces raisons, dans ce chapitre, une étude portant sur l'influence que peut avoir la variabilité des pratiques des consommateurs sur la variabilité de performance environnementale entre différentes pizzas sera présentée. En particulier, l'étude présentée dans l'article 1 se focalise sur des pizzas industrielles uniquement. Ici, nous étudierons comment les modes de préparation (ex : industrielle, fait maison) des pizzas ainsi que les pratiques des consommateurs peuvent influencer sur la performance environnementale finale de la pizza. Les trois modes de préparation choisis sont : pizza industrielle, pizza assemblée à domicile (à partir d'une pâte à pizza et d'une sauce tomate toute faite) et pizza faite maison. Cette étude avait également pour objectif d'étudier la qualité sensorielle des pizzas via leur appréciation par les consommateurs et de déterminer dans quelle mesure leur appréciation peut être liée à leur performance environnementale. Ainsi, cette étude porte sur deux des quatre axes de recherche en réponse à la problématique de la thèse : d'une part, l'étude de la variabilité de la qualité environnementale des produits alimentaires d'une même catégorie et, d'autre part, le lien entre la qualité environnementale et la qualité sensorielle des produits alimentaires d'une même catégorie (Figure 3.1).

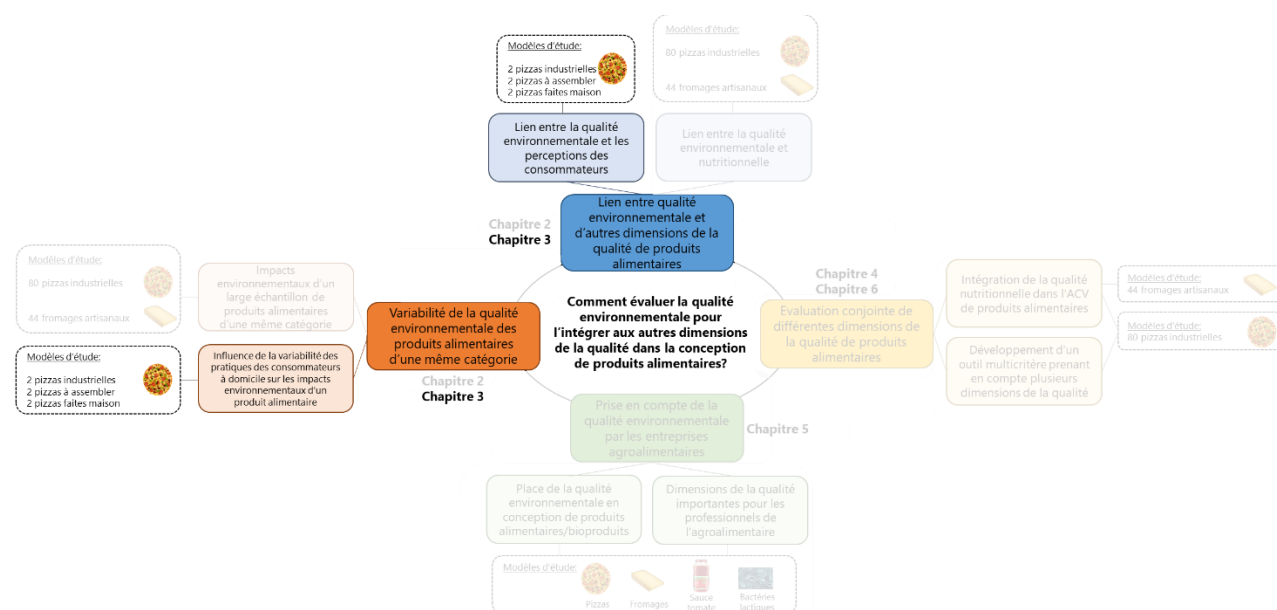


Figure 3.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 3

3.1 RESUME

Alors que la performance environnementale de la production agricole des aliments a été largement étudiée, ce n'est pas le cas des impacts environnementaux liés à la préparation des aliments au domicile du consommateur. Pour cette raison, l'objectif de cette étude était, d'une part, d'étudier l'influence des habitudes des consommateurs à domicile sur les impacts environnementaux d'un produit alimentaire et, d'autre part, de comparer la performance environnementale d'un produit alimentaire transformé selon différentes méthodes de fabrication (industrielle, faite à la maison et assemblée à la maison). Un autre objectif de cette étude était de confronter les performances environnementales des trois méthodes de fabrication évaluées par ACV aux perceptions et préférences des consommateurs. La pizza a été choisie comme modèle d'étude et 69 participants ont été recrutés pour préparer et consommer chacune des 6 pizzas à domicile (une pizza jambon/fromage et une pizza fromages, toutes deux préparées selon les 3 méthodes) pendant une période de 3 semaines. Les participants ont été invités à répondre à des questions relatives à leurs habitudes, à la préparation des 6 pizzas et à leurs perceptions et préférences via des questionnaires en ligne. Les réponses des participants aux questionnaires ont été utilisées pour évaluer les impacts environnementaux des pizzas en effectuant des ACV avec deux unités fonctionnelles (UF) différentes : 1 pizza et 1 kg de pizza. Les résultats montrent que les pratiques des consommateurs peuvent être très différentes d'un consommateur à l'autre et que cette variabilité a une influence non négligeable sur les impacts environnementaux des pizzas. Pour les deux UF étudiées, les pizzas faites maison ont tendance à avoir des impacts plus élevés que les autres sur les indicateurs environnementaux sensibles à la consommation d'électricité, bien que la tendance puisse être inversée en fonction des pratiques des consommateurs. Pour les indicateurs climate change et land use qui sont plus sensibles aux pratiques agricoles qu'aux

consommations électriques, les pizzas aux fromages sont plus impactantes, quel que soit le mode de fabrication de la pizza. Cette étude montre qu'il serait nécessaire de mieux inclure les pratiques des consommateurs dans l'évaluation environnementale des produits alimentaires afin d'aboutir à des représentations plus réalistes et permettant de sensibiliser les consommateurs à la manière dont ils peuvent faire évoluer leurs pratiques vers plus de durabilité.

3.2 ARTICLE 3 : HOW DO CONSUMER PRACTICES CONTRIBUTE TO THE ENVIRONMENTAL IMPACTS OF A FOOD PRODUCT? A CASE STUDY ON PIZZAS

Article soumis à **Journal of sustainable production and consumption**.

Cortesi, A, Colpaert, M., Saint-Eve, A., Maurice, B., Yannou-Le Bris, G., Souchon, I., Pénicaud, C.,. How do consumer practices contribute to the environmental impacts of a food product? A case study on pizza (Submitted to Journal of sustainable production and consumption).

Data paper soumis (co-soumission) à **Data in Brief** (Disponible en Annexe 3).

Cortesi, A, Colpaert, M., Saint-Eve, A., Maurice, B., Yannou-Le Bris, G., Souchon, I., Pénicaud, C.,. Data related to the Life Cycle Assessment of pizzas produced in different contexts and with real-world variability in consumer practices (Submitted to Data in Brief).

How do consumer practices contribute to the environmental impacts of a food product? A case study on pizza

Adeline Cortesi¹ , Marine Colpaert¹ , Anne Saint-Eve¹ , Bastien Maurice¹ , Gwenola Yannou-Le Bris¹ , Isabelle Souchon² , Caroline Pénicaud^{1,*}

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

² Avignon Université, INRAE, UMR SQPOV, 84000, Avignon, France

Abstract

The production and consumption of food is responsible for a considerable proportion of the environmental impacts linked to human activities. While the impacts of the agricultural production of food have been widely studied, less is known about the environmental effects associated with household food preparation by consumers. This study thus had two main goals: to study the influence of consumer practices at home on the environmental impacts of a food product and to compare the environmental performance of a single type of food prepared using different manufacturing methods (industrial, homemade, and assembled at home). We also wanted to compare the environmental impacts of the three manufacturing methods as assessed here to consumers' perceptions and preferences regarding the product. Pizza was chosen as a study model. Sixty-nine participants were recruited to prepare and consume six pizzas at home (one ham-and-cheese pizza and one mixed-cheese pizza, prepared using each of the three methods) during a three-week period. Participants were asked to complete questionnaires related to their habits, the preparation of the six pizzas, and their perceptions and preferences. The answers to these questionnaires were used to assess the environmental impacts of the pizzas via life cycle assessments (LCA) in SimaPro software using two different functional units (FUs): one pizza and 1 kg of pizza. Our results revealed that consumer practices can vary greatly from one person to another and that this variability has a non-negligible influence on the environmental impacts of pizza. For both FUs studied, the mixed-cheese pizza had higher environmental impacts on climate change and land use than the ham-and-cheese pizza regardless of the manufacturing method. This means that the pizza recipe has more influence than the manufacturing method on pizza environmental impacts for these two indicators. Instead, homemade pizzas tended to have higher impacts than industrial pizzas respect to environmental indicators that are sensitive to electricity consumption. Consumers tend to prefer homemade pizzas and think that they are better for the environment than industrial pizzas, which is not necessarily the case according to our results. This study demonstrates the importance of incorporating consumer practices into environmental assessments of food products in order to describe the environmental impacts more realistically and raise consumers' awareness of ways to reduce their own environmental footprint.

Keywords: LCA; food processing; food consumption; environmental assessment; sustainability

1. Introduction

Reducing the environmental impacts of human activities is one of the major challenges of the 21st century. In 2015, the United Nations established 17 sustainability goals, of which one was “responsible consumption and production” (UN, 2020). Production and consumption of food for human use contributes to 20 to 30% of environmental impacts worldwide (Tukker et al. 2006). For this reason, numerous studies have focused on environmental assessments of food products, with the goal of finding ways to decrease their impacts. Life cycle assessment (LCA) is a well-recognized approach that is widely used by the research and business communities as well as public authorities. It has been standardized in the ISO 14040 to ISO 14044 standards (EN ISO, 2006) and is recommended by the European Commission in the Product Environmental Footprint (PEF) framework (2013/179/EU Commission Recommendation). This multi-criteria assessment method takes into account the entire life cycle of a product and is generally the chosen method when it comes to assessing the environmental impacts of food products (Cucurachi et al., 2019).

The majority of studies on the environmental impacts of food products have concluded that agricultural production is a main contributor to the final product environmental impacts. For example, Weidema et al. (2008) showed that livestock breeding made the single largest contribution to the environmental impacts of dairy and meat products. Similarly, Dijkman et al. (2018) reviewed studies focusing on the environmental impacts of meat, cheese, and bread, and concluded that the agricultural stage was a major hotspot. However, the food consumption step—in other words, the activities related to the use of the food by consumers (including for example home storage or cooking)—is frequently excluded from the scope of the studied systems, generally due to a lack of data. This introduces a comparison bias between products that are manufactured completely outside of the home and those that are manufactured (at least in part) in the home. An exception to this is found in the study of Sonesson et al. (2005), who included the use step in a comparison of the environmental impacts of the same meal produced in different ways: homemade (prepared by boiling, frying and baking), semiprepared, and ready-to-eat microwave preparation. Those authors concluded that, in terms of environmental impacts, the overall differences among the three types of meal preparation were small: the ready-to-eat meal consumed the most energy but the homemade meal had a higher impact on eutrophication and global warming. That study did not address, however, the effect of variability in consumption practices, such as the use time of household equipment, on the final environmental impacts of the product. Instead,

Gruber et al. (2016) studied the environmental impacts of potatoes, rice, and milk studied in three different scenarios of consumer behavior: a base scenario (including, e.g., transport by car and cooking in an uncovered pot with heat reduction after boiling point), a conscious scenario (e.g., transport by walking and cooking in a covered pot with heat reduction after boiling point), and a careless scenario (e.g., transport by car and cooking in an uncovered pot without heat reduction after boiling point). The results showed that the use step can become

the main contributor to the environmental impacts of food products when using the careless scenario which means that the consumer practices can have a strong influence of the product environmental impacts.

A strong influence of consumer behavior on the environmental impacts of food was also highlighted by Matar et al. (2020) in a study of 132 scenarios of home storage of strawberries. In particular, the authors reported that the consumers' habit of opening the packaging before storing berries at home undermined the environmental benefits of modified atmosphere packaging in reducing food waste.

Consumer practices can differ from one household to another for several reasons, one being the type of household equipment available. For example, in France in 2015, 61% of households had a dishwasher and 84% owned a car (INSEE, 2019). However, practices regarding food can be shaped by many other factors such as habits or compromises with other constraints (e.g., time constraints). Consumers are increasingly attentive to the environmental impact of the food products they consume (Esmailpour and Rajabi, 2018), even if this is not usually considered a main criterion for food choices (Campbell et al., 2016). However, consumer knowledge regarding the environmental impacts of food is globally low. For example, Macdiarmid et al. (2016) highlighted a lack of consumer knowledge about the link between meat consumption and environmental impacts. Similarly, consumers tend to underestimate the energy consumption and greenhouse gas emissions associated with their food (Camilleri et al., 2019). Therefore, the way in which consumers perceive the environmental impacts of food products might not be consistent with the actual environmental performance. For this reason, it is important to have and disseminate informative data on the impact of consumer practices on the environmental impacts of products, and to understand consumers' perceptions of these impacts in order to help them make more environmentally friendly choices.

The goal of the current study was to investigate the influence of real consumer practices on the environmental impacts of a food product. Pizza was chosen as the study model, for three main reasons. The first is that pizza is a product that can be prepared in different settings, such as in an industrial facility or at home, and each method is associated with different practices at the use step. The second reason is that pizza is particularly appreciated in France, where its consumption is about 10 kg per capita each year; indeed, France has the largest per capita consumption of pizza in the world, along with the USA (PIC International, 2020). The third reason is that our team has already assessed the environmental impacts of 80 industrial pizzas (Cortesi et al. 2022a; Cortesi et al., 2022b), which provided a strong basis for the methodological choices in this study.

Here, different methods for preparing pizza—industrial, assembled at home from industrial ingredients, and homemade—were assessed by LCA, together with the variability in use practices of 69 consumer households. Consumers' perceptions of the environmental impacts of the different pizzas were also investigated in order to identify whether or not these were consistent with the environmental impacts calculated by LCA. Finally, data on consumers' overall appreciation of the different pizzas and perceptions of their impact on health were

evaluated so that these could be compared to the perceptions of environmental impacts.

2. Materials and methods

2.1. Pizza manufacturing methods

Three manufacturing methods were studied.

Manufacturing method 1 - Industrial pizza. An industrial pizza was bought at the supermarket and baked by the consumer at home.

Manufacturing method 2 – Pizza assembled at home. Industrial pizza dough, industrial tomato sauce, and all the toppings were bought at the supermarket. The consumer assembled all the ingredients, and baked the pizza at home.

Manufacturing method 3 - Homemade pizza. All the ingredients needed to make the pizza dough and the tomato sauce, as well as all the toppings, were bought at the supermarket. The consumer prepared the dough and the tomato sauce at home and assembled the pizza before baking it.

These three manufacturing methods were investigated using two study models: a ham-and-cheese pizza (Nutri-Score B) and a mixed-cheese pizza (Nutri-Score D). These two study models were selected because ham-and-cheese and mixed-cheese pizzas are the most popular types of pizza in France and because we wanted pizzas with different nutritional qualities in order to assess the potential impact of nutritional quality on the LCA results. For the sake of practicality, we will use the codes presented in Table 1 for describing the six pizzas used in this study.

Table 1. Pizza codes used in this study

	Ham-and-Cheese <i>NutriScore B</i>	Mixed-Cheese <i>NutriScore D</i>
Manufacturing method 1: Industrial pizza	Pizza Ind_H/C	Pizza Ind_C
Manufacturing method 2: Pizza assembled at home	Pizza Ass_H/C	Pizza Ass_C
Manufacturing method 3: Homemade pizza	Pizza Hom_H/C	Pizza Hom_C

The homemade and assembled-at-home pizzas were formulated to be as similar as possible to the industrial versions in terms of nutritional and sensorial characteristics. For example, Ind_H/C contained 208 kcal/100 g, so the assembled-at-home and homemade ham-and-cheese pizzas were formulated to be close to this value (203.4 kcal /100 g for Ass_H/C and 188.5 kcal/100 g for Hom_H/C). The nutritional values considered during the formulation

process were the amounts of energy, fat, saturated fat, carbohydrates, sugar, fiber, protein, and salt. More details related to the selection of the two industrial pizzas and the recipes of the assembled-at-home and homemade pizzas are available in the associated data paper.

2.2. Consumer recruitment

Sixty-nine consumers were recruited and asked to prepare and consume each of the six pizzas. The study lasted for three weeks; each week, each participant consumed two different pizzas. The ingredients and/or products required for the preparation of two pizzas were delivered to the consumer's house on a weekly basis. The order of consumption was balanced across participants and organized so that in a given week each participant did not consume the same type of pizza (H/C and C) or the same manufacturing method (Ind, Ass, Hom) more than once. More details related to consumer selection and the study schedule are available in the associated data paper.

2.3. Questionnaires

Data related to consumers' household equipment, their consumption habits, the preparation of the pizza, and their perceptions were collected through three online questionnaires. The questionnaires are available in the associated data paper and are summarized in the following sub-sections.

Questionnaire 1 (21 questions). This questionnaire was completed before the study began. The main topics were: Model and brand of different types of household equipment (in order to estimate electrical consumption); Distance between the consumer's home and the supermarket, and the type of transportation generally used to go grocery shopping.

Questionnaire 2 (44 questions). This questionnaire was completed after the preparation and consumption of each pizza (a total of six times). The main topics were: Pizza preparation (i.e. baking time, household equipment used); Pizza consumption (perceptions); Management of leftovers.

Questionnaire 3 (28 questions). This questionnaire was completed at the end of the study (after each consumer had prepared and consumed the six different pizzas). The main topic was:

Ranking of the six pizzas based on different criteria (i.e. liking and perceptions of nutritional value, manufacturing processes, and environmental impacts). Only the data associated with liking scores and perceptions of environmental and health impacts will be presented in this paper, together with the LCA results. The other data collected in this section will be presented in a separate, dedicated paper.

The answers to these questionnaires were analyzed in order to investigate variability in consumer practices regarding transportation between the home and the supermarket, home

storage of pizzas/ingredients, at-home preparation of the dough and tomato sauce (only for homemade pizzas), the baking of the pizza, and the cleaning of any equipment/utensils used to make/consume the pizza. The results related to the variability observed are presented in section 3.1. These answers were then used to generate the inventory data for the environmental impact assessment and to compare the perceptions of consumers regarding the six pizzas.

2.4. Environmental impact assessment

The environmental impacts of the pizzas were calculated using LCA following the standard steps (EN ISO, 2006): goal and scope definition, life cycle inventory analysis, life cycle impact assessment, and interpretation of results.

2.4.1. Goal and scope definition

The goals of the LCA were (i) to identify the main hotspots of the pizzas' environmental impacts as a function of the manufacturing method, (ii) to quantify the influence of consumer practices on the environmental impacts of the pizzas, and (iii) to compare the effects of the different manufacturing methods on the environmental impacts of the pizzas. The system perimeter included all steps from the agricultural production of the primary ingredients to consumption, and is shown in Figure 1.

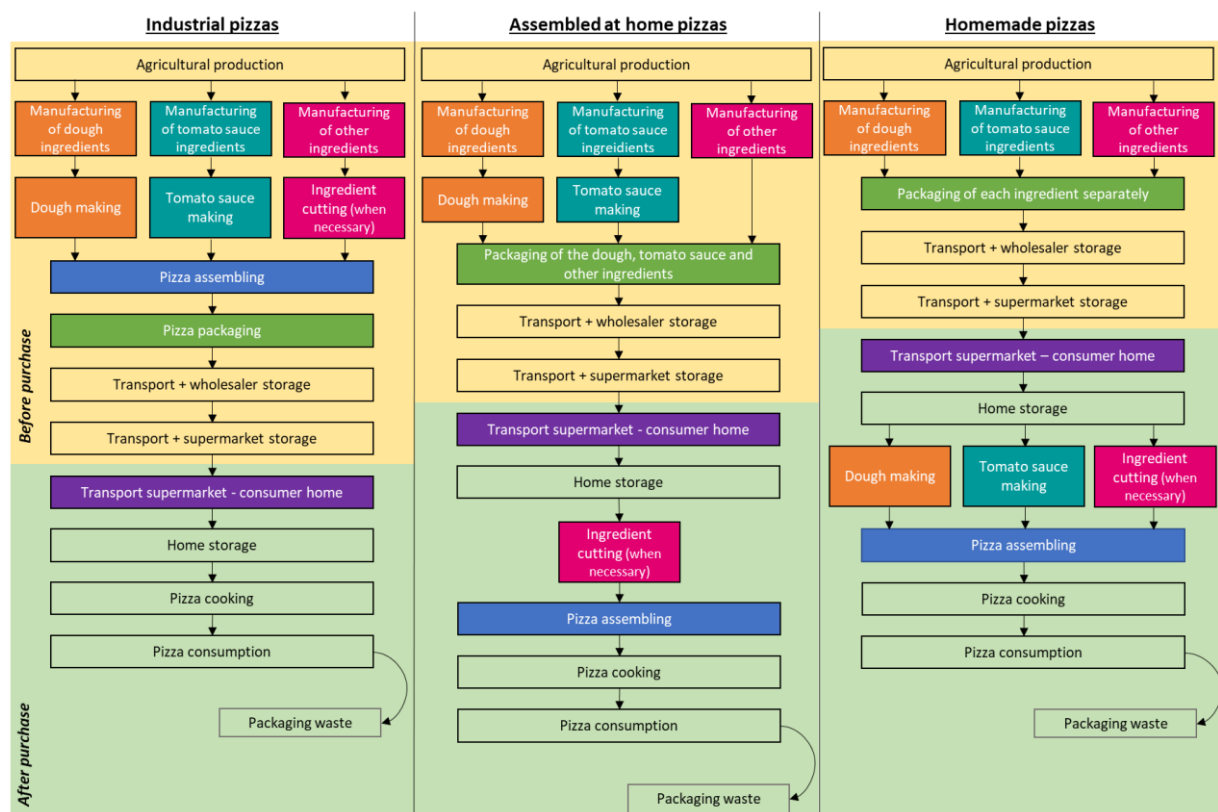


Figure 1. Steps included in the system perimeter for each manufacturing method (industrial, assembled at home, homemade). The yellow and green backgrounds delineate steps that took place before and after purchase, respectively. The other colors were used to highlight steps that occurred in a different order depending on the manufacturing method.

Because in this study consumers were asked to prepare and consume one pizza at a time, we chose a functional unit (FU) of one pizza after baking. However, the weights of the pizzas were different from one pizza to another. Therefore, the results obtained with a FU of one pizza are compared to those obtained with a FU of 1 kg of pizza in the results section.

2.4.2. Life cycle inventory analysis

2.4.2.1. Data collection

The main flows taken into account in this study were: primary materials (for ingredients and packaging), packaging waste, electricity, gas, water, and transportation. Background data from the databases AGRIBALYSE 3.0 and Ecoinvent 3.6 were used. Inventory data for the steps occurring before purchase were based on hypotheses in the AGRIBALYSE 3.0 database and a pizza LCI dataset (Cortesi et al., 2022b) adapted to the six pizzas studied here. Inventory data for the steps occurring after purchase were based on consumer answers to the questionnaires. More details about the collection of life cycle inventory data are available in the associated data paper. The transport step from the supermarket to the consumer's home was treated in a specific way. Since consumers did not go to the supermarket themselves (we provided them the ingredients and the pizzas necessary for the experiment), we modeled this step using their answers in questionnaire 1 (distance between their home and the supermarket, means of transportation used for grocery shopping). Furthermore, the majority of consumers stated in the questionnaire that they typically buy groceries once a week. We thus modeled a scenario in which each shopping trip provides for 14 meals (two meals per day for seven days). We also judged that a more typical frequency of pizza consumption was one pizza per week instead of the two eaten during the study period. Therefore, an allocation of 1/14 was used for the transport step to estimate the environmental impacts of transportation between the home and the supermarket that were attributable only to the pizza or to the ingredients needed to make the pizza.

2.4.2.2. LCI scenarios

Since some consumers returned incomplete questionnaires, we were not able to accurately assess the environmental impacts of each pizza prepared by each consumer. Therefore, different LCI scenarios were constructed to analyze the results.

Baseline scenario. Based on all the answers available, we calculated a weighted average for each variable of interest for each pizza. For instance, an average was calculated for the use time of the ovens used to cook the pizzas. When practices differed among consumers, weighting was applied. For example, since 24 of the 69 consumers used a small gasoline car for grocery shopping, a weighting of 24/69 was used for this means of transportation in the baseline scenario (the remaining 45/69 being distributed among the other practices such as walking,

large diesel car, etc.).

Best and worst scenarios. From all the available consumer answers, best and worst practices were modeled for each method of pizza preparation based on the authors' knowledge on the links between consumer practices and environmental impacts. For instance, for the baking step, the best practice was associated with the shortest oven use whereas the worst practice was associated with the longest oven use.

Random scenarios. In order to study the significance of the differences observed among the six pizzas using the baseline scenario, 69 random draws were performed of the available data collected through the questionnaires for each pizza. The datasets obtained mimicked the practices of the 69 participants of the study. For data following a normal distribution (Shapiro-Wilk test), the draws followed a normal distribution. The same was true for data following a log-normal distribution. For data not following a normal nor log-normal distribution, draws followed a uniform distribution.

Each of the different LCI scenarios was used for a different purpose. The baseline scenario was used for the definition of hotspots. The best and worst scenarios were used to assess the influence of variability in different consumer practices on the environmental impacts of the pizzas. The 69 random scenarios were used to assess the influence of the manufacturing method on the pizzas' environmental impacts.

2.4.3. Life cycle impact assessment

All the LCA presented in this study were performed using SimaPro 9.1.0.11 software and the characterization method "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set". All the midpoint impact categories available in this method were calculated, but only a subset are discussed here: climate change, ozone depletion, ionizing radiation, photochemical ozone formation, particulate matter, acidification, eutrophication (marine), eutrophication (freshwater), eutrophication (terrestrial), land use, water use, resource use (fossil), and resource use (minerals and metals). The three remaining indicators were not included in the study since they are poorly modeled (Sala et al. 2018).

2.4.4. Statistical treatment of the results

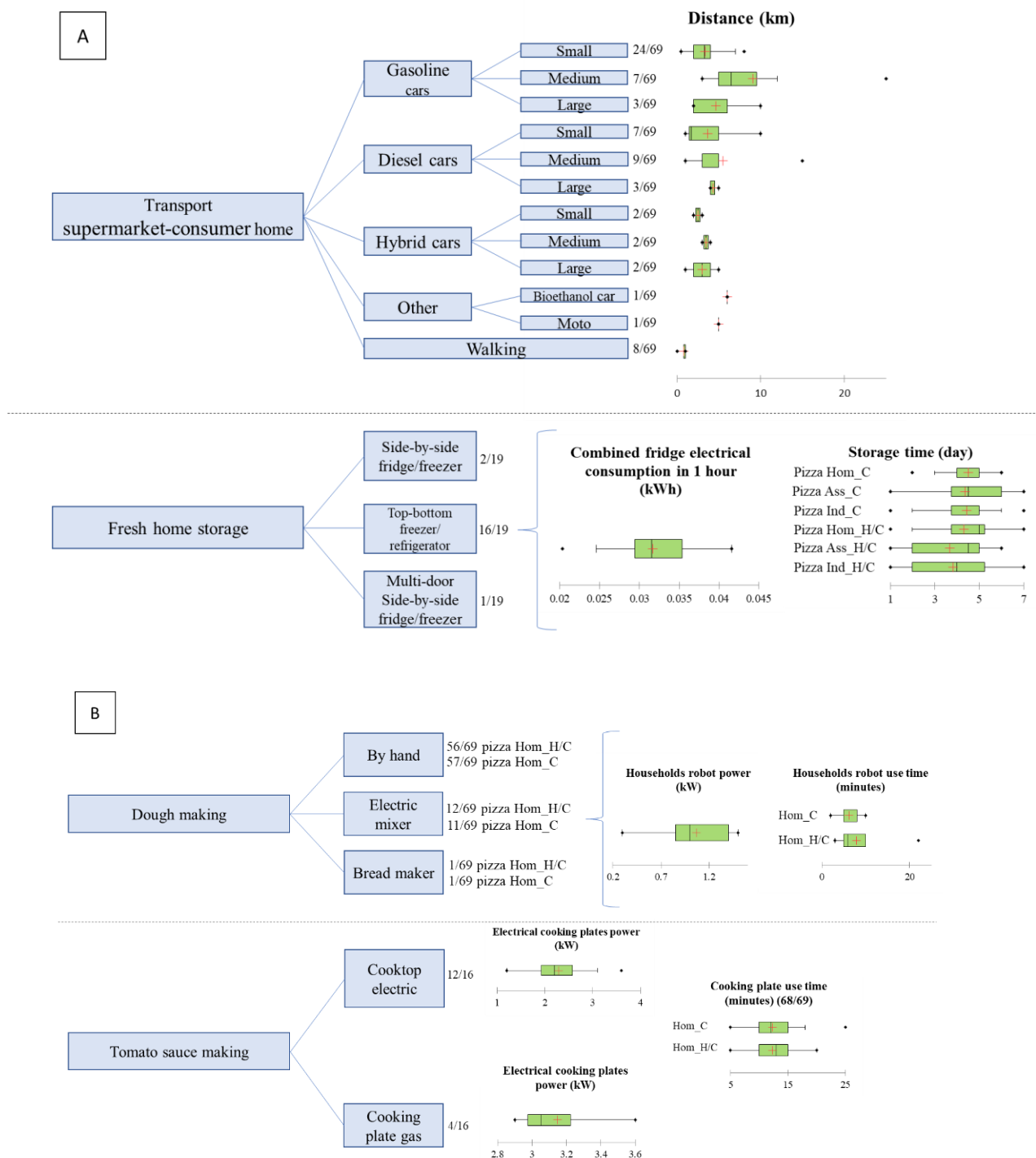
The normality of the data collected through the questionnaires was assessed using a Shapiro-Wilk test carried out in XLStat software (version 2020, 5.1.1043).

The significance of differences observed among the six pizzas was assessed using a Kruskal-Wallis test associated with a Dunn test on the 69 LCA calculated for each of the pizzas.

3. Results and discussion

3.1. Variability in consumer practices

This section will discuss the variability in consumer practices as reported in the questionnaires. Figure 2 shows the different practices reported by the study participants for each preparation step and the proportion of participants using each practice.



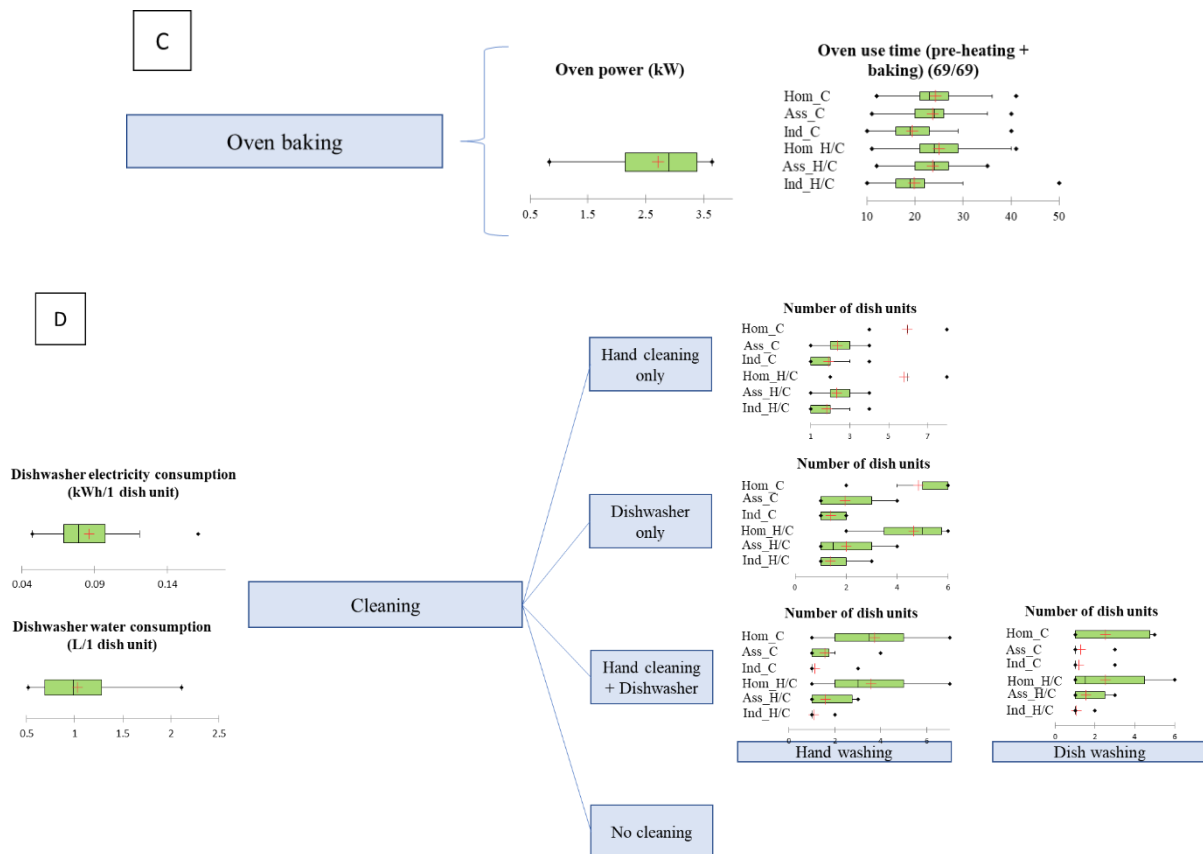


Figure 2. Representation of the different practices of the consumers in this study, with the proportion who used each practice (n/n_{total}). The variability in the responses is depicted using boxplots. A: transport and storage; B: preparation of dough and tomato sauce for homemade pizza; C: pizza baking; D: equipment cleaning

3.1.1. Transport from supermarket to home

Figure 2.A shows the variability in consumer practices for transporting food from the supermarket to the home. All 69 consumers reported their most commonly used means of transportation for grocery shopping as well as the distance between their home and their usual supermarket. Twelve means of transportation were identified and the most frequently used was the small gasoline car (24/69). The distances between a consumer's home and his or her usual supermarket ranged from 0.3 to 25 km.

3.1.2. Home storage

Figure 2.A shows the variability in consumer practices with respect to storage of the pizza or the fresh ingredients needed to make the pizza. Participants were asked to report the power

of their fridge (or at least the brand and model) and how full it typically is. Nineteen consumers answered this question and three main types of fridge were identified: Side-by-side freezer/fridge, (top- or bottom-freezer fridge, and multi-door side-by-side fridge. Figure 2.A also presents the variability in the electricity consumption of the most frequently mentioned fridge model (combined fridge) and the variability in the storage times for all pizzas.

3.1.3. Dough making

Figure 2.B presents the variability in consumer practices regarding homemade dough making. To prepare the dough at home, participants either mixed it by hand or using household equipment. For pizza Hom_H/C, 13 consumers reported that they used electrical equipment, while 12 did so for pizza Hom_C. Of these, one person used a bread maker while the others used an electric mixer. For pizza Hom_H/C, the use time of the electric mixer ranged from 3 to 22 minutes and from 2 to 10 minutes for pizza Hom_C. For the participant who used a bread maker, the use time was 85 minutes for both pizzas.

3.1.4. Tomato sauce making

Figure 2.B presents the variability in consumer practices for making the homemade tomato sauce. Of the participants who provided information on their cooking method, 12 used electric cooktops and 4 used gas cooktops. As reported by 68 of the consumers, the cooking time for the tomato sauce was typically approximately 10 to 15 minutes for both pizzas, but ranged from 5 to 20 minutes for pizza Hom_C/H and from 5 to 25 minutes for pizza Hom_C.

3.1.5. Pizza baking

Figure 2.C focuses on the variability in consumer practices for baking the pizzas. All 69 consumers reported the time they used their oven for baking the pizza (including pre-heating and cooking time). The oven use times were quite variable among participants, up to a factor of 5 in the case of pizza Ind_H/C (range: 10 to 50 min). On average, the cooking time for industrial pizzas was shorter than that of the homemade pizzas or those assembled at home, which makes sense because industrial pizzas are pre-baked. Globally, the use time of ovens was above the recommended cooking times (between 6 and 8 min for pizza Ind_H/C). This was due to the fact that the preheating time varied greatly depending on the consumer's oven, but may also have been longer than necessary.

3.1.6. Dish cleaning after pizza preparation/consumption

Figure 2.D depicts the variability in consumer practices for cleaning dishes after pizza preparation/consumption. All 69 participants provided information on the cleaning method used (no cleaning, dishwasher cleaning only, hand-cleaning only, or both) as well as the

number of dishes units cleaned. One dish unit represents the equivalent of one plate, one fork, and one knife. The number of dish units represented by the different types of kitchen equipment used are available in the associated data paper. The proportion of participants who used each cleaning method varied among the different pizzas. Figure 2.D also presents the variability in electricity and water consumption per dish unit as estimated for the different dishwashers, taking into account the reported program and capacity used. For handwashing, the type of water heater (electric or gas-based) was taken into account but we did not model any variability in the water and energy consumption per dish unit. More details on the proportions of consumers with electric and gas water heaters are available in the associated data paper.

3.2. Hotspot definition

This section describes the relative contribution of different life cycle steps to a pizza's impact on 13 environmental indicators, calculated using the baseline scenario (described in section 4.2.2.2). Figure 3 presents the results obtained for pizza Ass_H/C. The agricultural step includes the production of the primary ingredients and, for meat ingredients, includes slaughter. Ingredient transformation refers to the transformation of agricultural products into ingredients. The packaging step includes packaging materials as well as the transportation of those materials to the factory. Distribution includes the storage of ingredients at the wholesale facility and at the supermarket as well as the transportation related to distribution. The transport step refers to the transportation of pizzas/ingredients from the supermarket to the home. The home cooking step includes both pre-heating and baking. The dish cleaning step includes the cleaning of the utensils used for the preparation and consumption of the pizza. Finally, the step called "other" includes dough making, tomato sauce making, waste, and fresh storage in the house. These steps were grouped because of their low contribution to the overall environmental impacts.

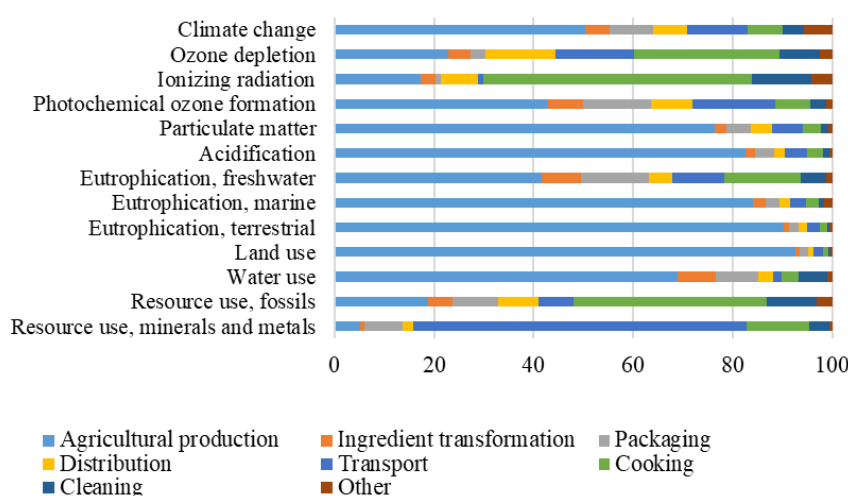


Figure 3. Contributions of the main production steps of pizza Ass_H/C (baseline scenario) to 13 environmental indicators calculated using the EF3.0 method.

For the pizza represented in Figure 3 (ham-and-cheese, assembled at home), the agricultural production of ingredients was the main contributor to its impact on nine environmental indicators: climate change, photochemical ozone formation, particulate matter, acidification, eutrophication (freshwater), eutrophication (marine), eutrophication (terrestrial), land use, and water use. This is logical because these environmental indicators are all linked to agricultural practices. For example, the greenhouse gas (GHG) emissions from farm animals and farm machinery make notable contributions to climate change (Dollé et al., 2011), while eutrophication is increased by the spreading of manure (Le Moal et al. 2019). In this, our result is consistent with the current literature (Cucurachi et al., 2019).

The home cooking step was the main contributor to this pizza's impact on ozone depletion, ionizing radiation, and resource use (fossil), which makes sense since these indicators are sensitive to electricity consumption. Here, electricity consumption was modeled with a French electricity mix, which is heavily based on nuclear power (67%) (RTE, 2021); this likely explains the strong influence of the cooking step on ionizing radiation (generated by the nuclear production of electricity (Frischknecht et al., 2000)) but the relatively small impact on climate change (less than 10% for all pizzas). In this, our study differs from that of Frankowska et al. (2020), who concluded that the cooking step could be responsible for 6% (for pre-cooked food products) to up to 61% (for raw products) of the total GHG emissions of a food product. This difference might be due to the fact that those authors based their calculations on the UK electricity mix, which is mainly composed of GHG-producing fossil fuels such as natural gas (42%) and coal (9%) (Energy UK, 2022), with only 21% of electricity derived from nuclear power. Even though the impact of the cooking step on climate change was relatively minor in this case, this step was still a major hotspot for other environmental indicators, especially those, like ionizing radiation, that are sensitive to nuclear electricity production. Optimization of this step might therefore be a potential means of reducing the environmental impacts of food products.

Transportation from the supermarket to the home was the main contributor to the impact on resource use (minerals and metals), which reflects for example the use of metals to make and maintain cars. However, this study did not examine either the materials used to manufacture home appliances/equipment or those used for food processing at factories, which could lead to an underestimation of the impact of these steps on this indicator, and therefore a overestimation of the home transport contribution.

The results were globally similar for the other five pizzas, although the contribution of tomato sauce making (included in "other") for the homemade pizzas resulted in stronger impacts on some environmental indicators for homemade pizzas (up to 14% of ionizing radiation for pizza Hom_C).

3.3. Influence of variability in consumer practices on the environmental impacts of pizzas

Next, we investigated how sensitive the LCA results were to different scenarios based on the

practices reported by study participants (Figure 2). In this section, we will present the parameters for which variations in inventory data generated the most change in LCA results: cooking time, transportation between the home and the supermarket, and management of pizza leftovers.

3.3.1. Influence of cooking time

The influence of cooking time on the environmental impacts of pizzas was investigated by comparing the LCA results obtained with the shortest cooking time (best scenario), baseline cooking time, and the longest cooking time (worst scenario). Figure 4 shows the environmental impacts of pizza Ind_H/C (chosen because it had the widest reported range of cooking times) in each of these three cases. The environmental impacts associated with the best and baseline scenarios were expressed as a percentage of those found in the worst scenario.

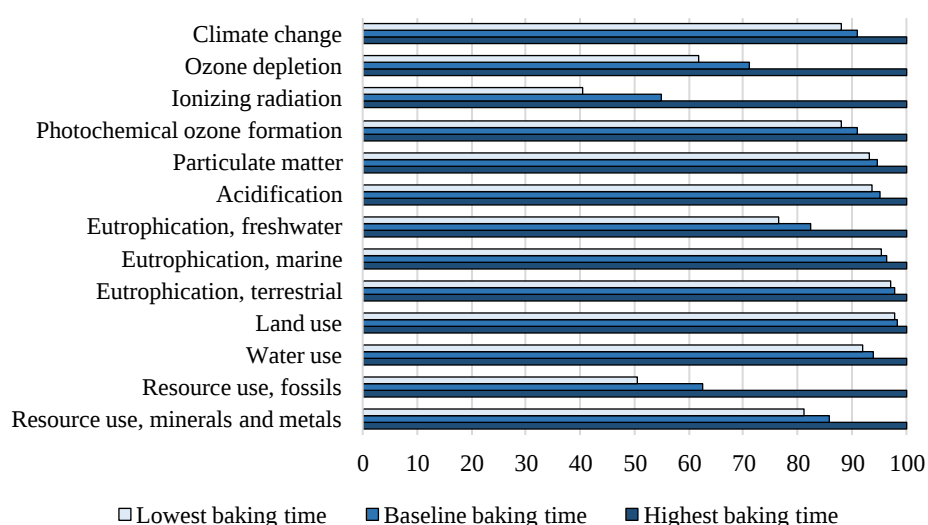


Figure 4. Differences in the environmental impacts of pizza baked for the shortest cooking time (light blue), the baseline cooking time (medium blue), and longest cooking time (dark blue) reported by consumers (Pizza Ind_H/C)

As shown in Figure 4, it is clear that a reduction in the time of oven use at home (including pre-heating and baking) was accompanied by a reduction in the pizza's impacts on all studied environmental indicators. The magnitude of the reduction between the best and worst scenarios varied depending on the indicator, ranging from 2% (land use) to almost 60% (ionizing radiation). Ozone depletion, ionizing radiation, and resource use (fossil) were the most sensitive indicators to variations in cooking time, which is consistent with the fact that the cooking step was a major contributor to the impact on these indicators (discussed in section 3.2). Reductions in the duration of home oven use can thus lead to notable reductions in the environmental impacts of a food product, especially for environmental indicators that are sensitive to electricity consumption.

3.3.2. Influence of transportation from the supermarket to the home

3.3.2.1. Influence of distance

As highlighted in Figure 3, the transportation of a pizza (or its ingredients) from the supermarket to the home has a non-negligible effect on its environmental impacts; indeed, this step was the main contributor to the use of mineral and metal resources. To investigate the influence of the distance between the supermarket and the home, we modeled the most frequently reported means of transportation (gasoline car) and two extreme scenarios: a best scenario of the shortest distance reported by gasoline car users (1 km roundtrip) and a worst scenario of the longest distance reported by gasoline car users (16 km roundtrip). Figure 5 depicts the comparison between the best and worst scenarios and the baseline scenario (calculated using the average distance reported by users of small gasoline cars).

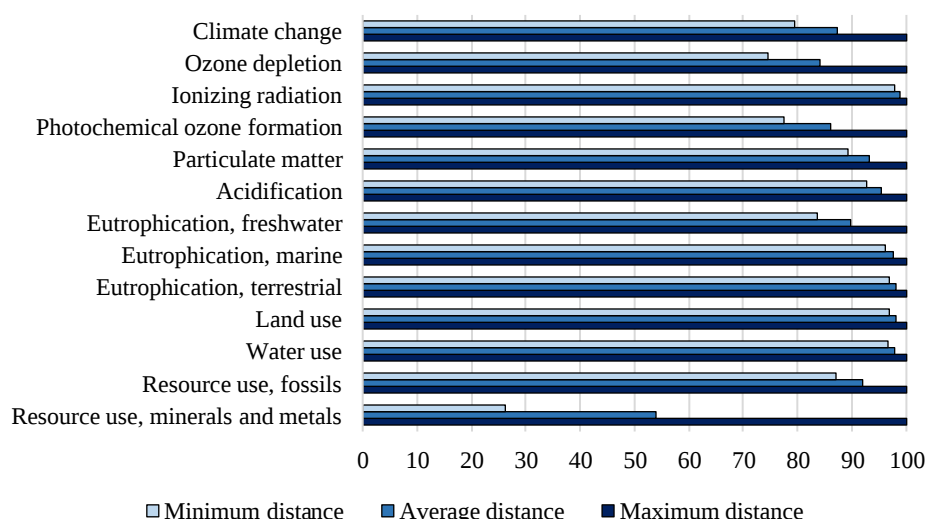


Figure 5. Comparison of the impacts of pizza Ind_H/C on 13 environmental indicators as modeled using the shortest (best scenario), average (baseline scenario), and longest (worst scenario) transportation distances reported by gasoline car users.

The difference in the environmental impact between the best and worst scenarios ranged from 2% (ionizing radiation) to 25% (ozone depletion), with the exception of mineral and metal resource use for which the difference was close to 75%. It is thus clear that a reduction in the distance traveled by passenger car can significantly reduce the environmental impacts of a pizza.

3.3.2.2. Influence of grocery shopping practices

In all analyses presented thus far, an allocation factor of 1/14 was used for transportation between the supermarket and the home because we assumed that only a single shopping trip was made per week (2 meals per day, see section 2.4.2). However, even if this practice was used by the majority of consumers (46/69), other habits were also reported: grocery shopping twice

a week (11/69), twice a month (8/69), once a month (1/69), less than once a month (1/69), or more than twice a week (1/69). We thus decided to examine the influence of grocery shopping habits on the environmental impacts of the pizzas, specifically by comparing three practices: grocery shopping once a month (1 pizza = 1 of 60 total meals (2 meals each day)), grocery shopping twice a week (1 pizza = 1 of 7 total meals), and a shopping trip specifically made to buy only one pizza. In other words, we analyzed the impact of the following allocations: 1/60, 1/7, and 1. Figure 6 shows the comparison of the influence of these three grocery shopping practices on the environmental impacts of pizza Ind_HC (baseline scenario).

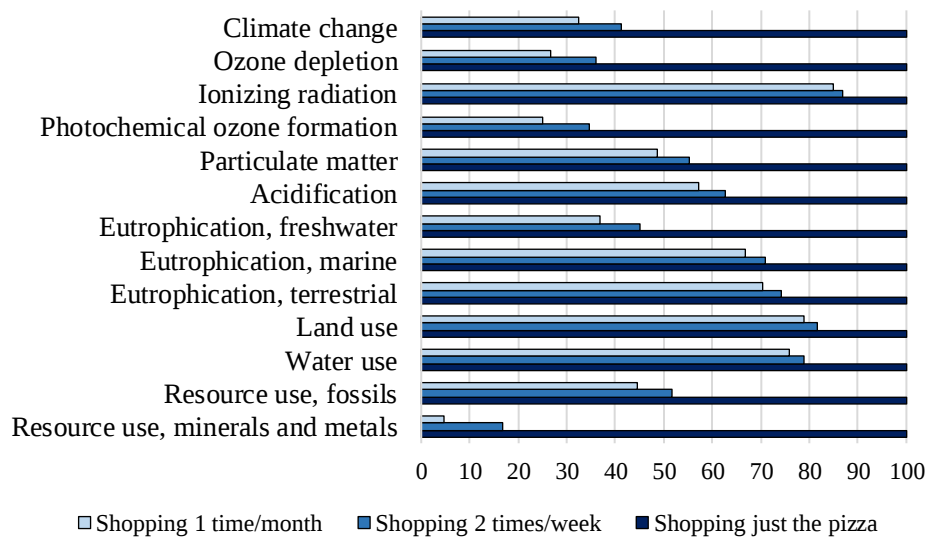


Figure 6. Comparison of the environmental impacts of pizza Ind_H/C with three different shopping habits

From Figure 6 it is clear that grocery shopping habits can have a large influence on the environmental impacts of food products, with a single shopping trip per month being associated with lower impacts than grocery shopping twice a week. A trip to the store for the sole purpose of buying a pizza was by far the worst-case scenario: the pizza's impact on five environmental indicators was at least double compared to a scenario in which grocery shopping occurs twice a week. From this, it is evident that planning their shopping trips to buy food for as many meals as possible is an important way in which consumers can reduce the environmental impacts of food products. This topic was also addressed by ADEME (2017), who reported that the optimization of transportation habits can have a stronger influence on the environmental impacts of a product than the distances traveled. In other words, the transport of a given product over a long distance in an optimized manner can result in lower greenhouse gas emissions than transport over a shorter distance in an unoptimized manner (such as in a partially empty vehicle, for example).

In our study, this argument is particularly relevant because the majority of consumers used their car to go grocery shopping. However, this is not the case for the French population as a whole, and practices can differ greatly among different environments. For example, in suburban areas, more people tend to use a car to go shopping (84% for large stores and 56% for

small/medium stores) than in the city center (51% for large stores and 54% for small/medium stores) (Cerema, 2020).

3.3.3. Influence of the management of pizza leftovers

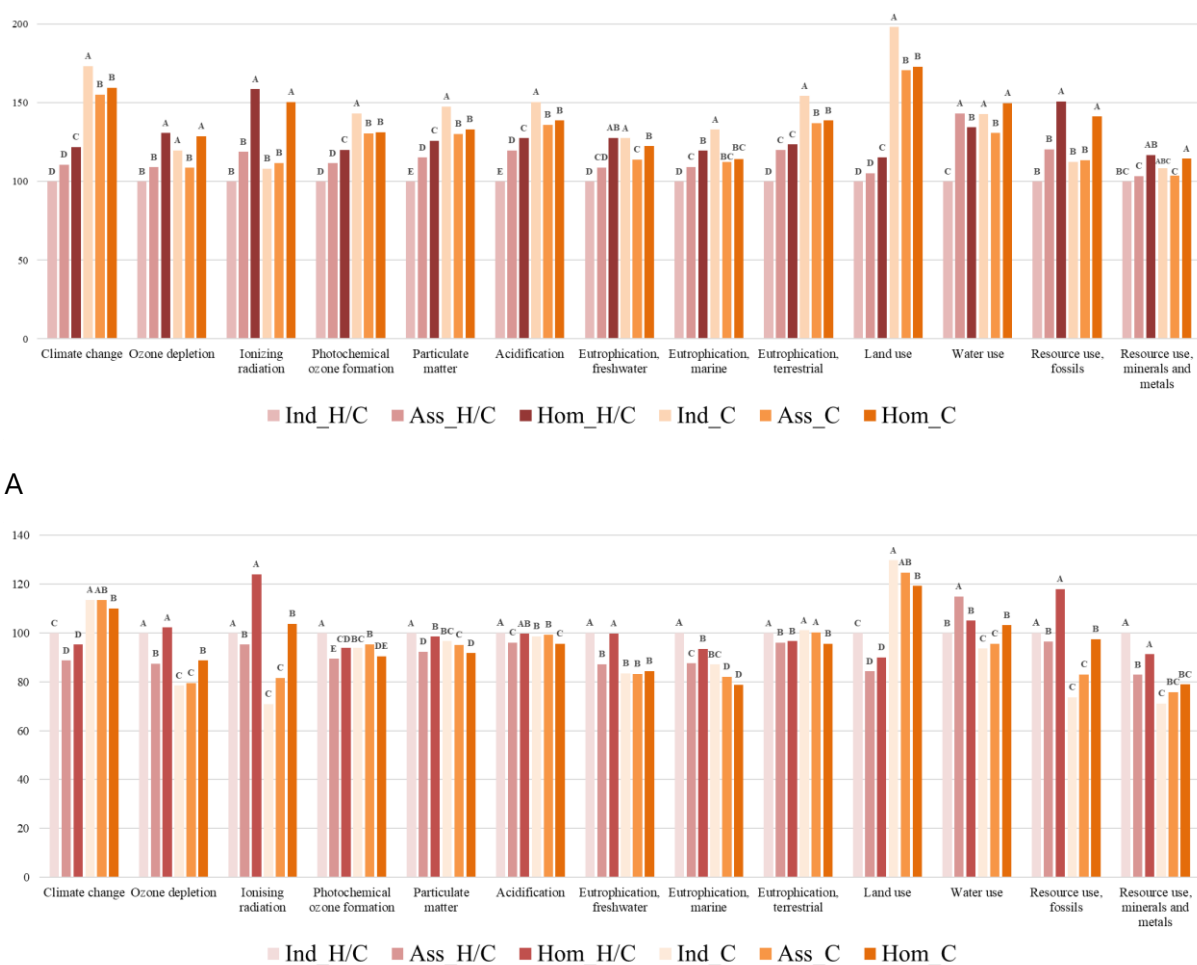
The number of participants who reported having leftovers after their meal was 19 for Ind_H/C, 19 for Ind_C, 23 for Ass_H/C, 20 for Ass_C, 22 for Hom_H/C, and 24 for Hom_C. Several options were then possible: storing leftovers in the fridge before re-heating (microwave or electric oven) and consuming them, throwing leftovers away, or giving leftovers away. The environmental impacts of leftovers varied depending on their fate.

Storing and cooking leftovers in a microwave oven had lower environmental impacts than storing and cooking leftovers in an electric oven due to the lower use time of the equipment (10 s–4.5 min for microwave, 5–38 min for electric oven, all pizzas taken together). Indeed, re-heating leftovers in a microwave only slightly increased the overall environmental impacts of the pizzas (i.e. less than 4% for pizza Ass_HC on all indicators for the longest storage time and the longest microwave use), while re-heating leftovers in the oven could have a significant impact, especially for indicators that are sensitive to electrical consumption. For example, re-heating leftovers of pizza Ass_HC in the oven for 38 min induced an increase of almost 87% of the pizza's impact on ionizing radiation and more than 62% on fossil resource use, while with a 5-min oven use time, re-heating generated an increase of only 11% for ionizing radiation and 8% for fossil resource use. Therefore, from an environmental point of view, leftovers should preferably be reheated in a microwave or at least using the oven for only a short amount of time.

Even though storing and re-heating leftovers generates an additional environmental impact, throwing them away is not a better option. Among the participants in this study, 9 admitted throwing away the leftovers (pizza, crust, or topping) of pizza Ind_H/C, 4 for pizza Ind_C, 5 for pizza Ass_H/C, 5 for pizza Ass_C, 9 for pizza Hom_H/C, and 12 for pizza Hom_C. Among the consumers who threw away their leftovers, the average amount discarded was 21.5% (w/w) of the pizza. If we take the example of the two industrial pizzas, 21.5% (w/w) represents 81.7 g of pizza Ind_H/C, i.e. 170 kcal, and 124.7 g of pizza Ind_C, i.e. nearly 300 kcal. When leftovers are consumed, they are used as part of a second meal. However, when leftovers are discarded, the consumer must consume another food product at the next meal, which creates an additional environmental impact. The average total energy intake of an adult aged 18 to 79 years amounts to 2 144 kcal per day (ANSES, 2017), which is responsible for the emission of about 5 kg CO₂ eq per day (Pointereau et al. 2019). In this case, the additional environmental impacts due to discarding the pizza leftovers amounted to 0.4 kg CO₂ eq for pizza Ind_H/C and 0.7 kg CO₂ eq for pizza Ind_C, that is to say an increase of 8% and 14%, respectively, of the daily emissions of CO₂ eq related to food.

3.4. Influence of manufacturing method on the environmental impacts of pizzas

As described in section 3.3, variability in consumer practices can have a strong influence on the environmental impacts of a pizza. To analyze the environmental impacts among different pizzas, we controlled for this variability using random scenarios (explained in section 2.4.2.2). Furthermore, since the six pizzas differed in weight due to differences in the availability of nutritionally and sensorially similar products in the French retail market, we also examined the results using a standardized functional unit (FU): 1 kg of weight. Therefore, the same 69 random draws were analyzed twice: once using an FU of 1 pizza, and a second time using an FU of 1 kg of pizza. The results for both FUs are presented in Figure 7.



B

Figure 7. Comparison of the environmental impacts of all six pizzas using the baseline scenario and an FU of 1 pizza (A) or 1 kg of pizza (B). The significance of differences was evaluated using a Kruskal-Wallis test associated with a Dunn test performed on the 69 LCIs obtained for each pizza using random scenarios. The letter "A" corresponds to the pizza with the highest average impact using the 69 random scenarios.

The pizzas' impact on climate change and land use seemed to be more influenced by their ingredients than by the manufacturing method: for both FUs, and regardless of the

manufacturing method, the mixed-cheese pizzas had higher environmental impacts than the ham-and-cheese pizzas. This makes sense because these two indicators are strongly influenced by agricultural production. Other environmental categories that are tied to agricultural production—such as photochemical ozone formation, particulate matter, acidification, and terrestrial eutrophication—followed the same trend: with an FU of 1 pizza, the mixed-cheese pizzas appeared to have stronger overall effects than the ham-and-cheese pizzas. However, when the FU was 1 kg of pizza, the pattern for these indicators shifted, meaning that the observed differences were linked more to the difference in weight among pizzas (Ind_HC: 380 g; Ass_HC: 474 g; Hom_HC: 486 g; Ind_C: 580 g, Ass_C: 520 g, Hom_C: 551 g) than to the pizza recipes.

Instead, manufacturing method appeared to have an influence on the environmental indicators ionizing radiation, ozone depletion and resource use fossils. For both ham-and-cheese and mixed-cheese pizzas and for both FUs, the homemade pizzas tend to have higher impacts than the industrial or assembled-at-home pizzas on these indicators when looking at the baseline scenarios. However, the difference is not significant in some cases (e.g., between homemade and industrial mixed-cheese pizzas for an FU of 1 pizza on the indicator ozone depletion). This means that, the trend observed with the baseline scenario can be reversed depending on the consumers practices. These higher impacts for homemade pizzas compared to the others make sense because homemade pizzas tend to require more electricity to prepare (mostly due to a longer cooking time) than industrial pizzas, and electrical consumption generally has a strong influence on ionizing radiation and fossil resource use. However, these findings differ from those of Sonesson et al. (2005), who, after comparing the environmental impacts of the same meal prepared in different ways, concluded that the ready-to-eat meal (industrially prepared) were more energy-intensive than the homemade version. The most likely interpretation of this inconsistency is that an industrial food product can be more or less energy-intensive than a homemade version depending on the item in question.

No general trends were apparent for the other environmental indicators (eutrophication (marine), eutrophication (freshwater), water use, and resource use (minerals and metals)). These indicators are mainly affected by agricultural production, which means that any differences observed were mostly due to the weight differences among pizzas in the proportions of various ingredients.

The fact that the use of different FUs led to different conclusions demonstrates the potential sensitivity of LCA to differences in methodology. In general, it could be useful to compare results obtained with different FUs in order to have a better understanding of the environmental impacts of a product and avoid bias in the conclusions.

3.5. Comparison of consumer preferences and perceptions of the studied pizzas

At the end of the study, consumers were asked to rank the six pizzas according to their preferences and their perceptions of the environmental and health impacts of each one. The

average ranking obtained for each pizza for each of the three questions is represented in Figure 8. For all three questions, the higher the ranking, the more positive the preference/perception.

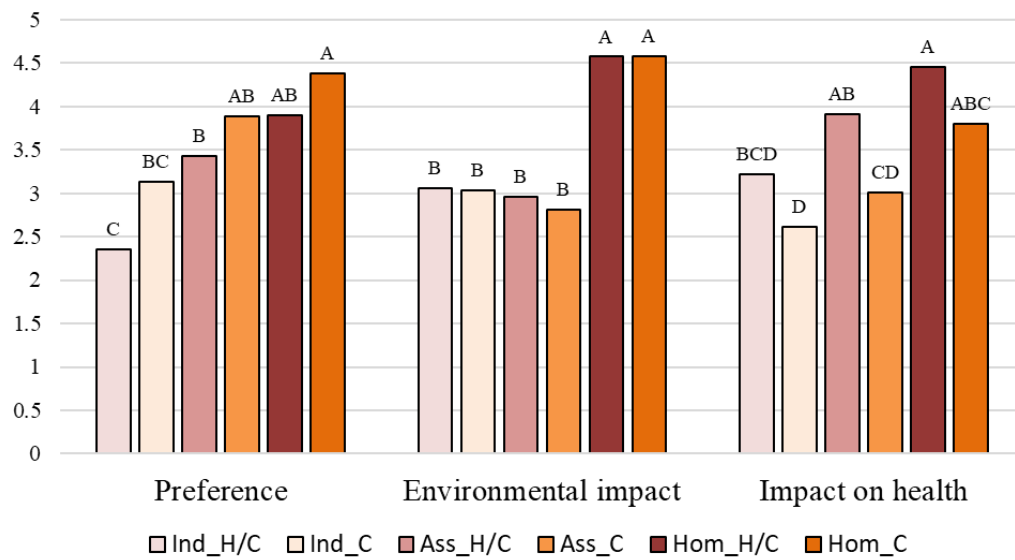


Figure 8. Comparison of the average ranking of the six pizzas with respect to consumers' perceptions and preferences. The significance of differences was assessed using a Kruskal Wallis test followed by a Conover-Iman test; different letters indicate a significant difference.

For both the ham-and-cheese and the mixed-cheese pizzas, the homemade version was generally the most preferred, followed by the one assembled at home and finally the industrial product. It is likely that the homemade pizzas were globally preferred because home cooking is associated with distinct social, cultural, and emotional (e.g., nostalgia) dimensions (Mills et al., 2020). Furthermore, homemade food products are often perceived as more "natural" than more-processed food products, and the "naturalness" of food is very important for the majority of consumers (Román et al., 2017). This could also explain why homemade pizzas tended to be preferred over the assembled-at-home and industrial versions.

For both recipes, homemade pizzas were perceived to have the lowest impact on the environment, with the industrial and assembled pizzas considered nearly equivalent. This could be due to the high amount of packaging needed in the latter two preparations. Indeed, Lea and Worsley (2008) showed that consumers view a reduction in packaging as the most important way to reduce the environmental impacts of food products. Furthermore, the association of a homemade product with "naturalness" can also extend to a low environmental impact in consumers' minds (Román et al., 2017). With respect to health, industrial pizzas were on average perceived as the worst, while homemade pizzas were perceived as the best. This association between industrial preparation and unhealthy food echoes the message of a current national health and nutritional program in France which recommends increasing the consumption of homemade meals and reducing that of highly processed food (Ministère des solidarités et de la santé, 2019). In their literature review, Pinto et al. (2021) also reported that processed foods tend to be seen as bad for health.

Within each manufacturing method, the mixed-cheese pizza was more appreciated than the ham-and-cheese one. However, in each case, the ham-and-cheese pizza was perceived as being the more healthful of the two, which was consistent with their Nutri-Scores (B for ham-and-cheese vs. D for mixed-cheese). It thus appeared that the participants viewed the mixed-cheese pizzas as the “pleasurable” choice—better tasting but with a negative impact on health—while the ham-and-cheese pizzas were seen as a more responsible—less preferred but more healthful—choice. Between the manufacturing method and the recipe, the manufacturing method had a stronger influence on consumer perceptions for all studied questions. In other words, to improve the nutritional and environmental quality of their meal, consumers tended to think that substituting an industrial pizza with a homemade one would have more of a benefit than substituting a ham-and-cheese pizza with a mixed-cheese pizza (or vice-versa). From a nutritional point of view, this is not necessarily the case, since the homemade and assembled-at-home pizzas were formulated to be as similar as possible to the industrial products. Therefore, in this study, there were more nutritional differences between the two recipes than between an industrial pizza and a homemade one. The effect of differences between pizza recipes was recently demonstrated by Adjibade et al. (2022), who reported that substituting a typical pizza with one with a different recipe formulation (less calories, higher vegetable content, and a dough based on whole grain) reduced the risk of type 2 diabetes. From an environmental point of view, as discussed in section 3.4., the choice is not necessarily as straightforward, which demonstrates the necessity of educating consumers on the environmental impacts of their food.

3.6. Recommendations

3.6.1. Recommendations for consumers

Our results revealed that consumer practices can have a strong influence on the environmental impacts of a food product, especially for environmental indicators that are sensitive to electricity consumption. For example, one way for consumers to reduce the environmental impacts of food consumption could be to ensure that they do not preheat the oven for too long. When possible, it could also be a good idea to cook different food products at the same time in order to reduce the total oven use time, especially for a large oven. Another factor that played an important role in determining the environmental impacts of the pizzas examined here was the transport of the pizza or its ingredients from the supermarket to the home. One obvious recommendation would be to walk whenever possible. If this is not feasible, the use of public transportation like a bus instead of a passenger car is associated with a notable reduction in CO₂ emissions, as shown by Ribeiro and Fonseca (2022) in a study of students traveling from their homes to their universities. It is also recommended to optimize the trip to the supermarket as much as possible by purchasing food for multiple meals and avoiding specific trips for only one food item.

Finally, minimizing waste of food leftovers and eating them in a subsequent meal can reduce the CO₂ eq emissions of a day's food intake. ADEME (2020) recently estimated that, if the greenhouse gas emissions associated with global food waste were compared with the amounts generated by individual countries, food waste would rank third on the list of global producers. Food waste is therefore a major environmental issue, with 10 million tons of edible food being wasted each year in France. For this reason, the French government has made it an explicit goal to reduce food waste by 50% by 2025 (ADEME, 2020). In this, consumer practices can play an important role; for example, each year the average French person throws away 7 kg of food products that are still in their original packaging. However, as demonstrated by our results, even if it is always preferable to eat leftovers rather than throw them out, care must be taken when reheating leftovers in order to minimize the use time of appliances and thus avoid high impacts on environmental indicators that are sensitive to electricity consumption.

3.6.2. Recommendations for public policies

Although consumer practices can have a strong influence on the environmental burden imposed by food production and consumption, consumers seem to have biased perceptions regarding the impacts of their food choices and practices. For example, the consumers in our study tended to perceive the homemade pizzas as having fewer environmental impacts than the other products, but the LCA results showed that this was not necessarily true. A similar pattern was noted in a study of meat production that reported that consumers had difficulty estimating the environmental impacts of their food (Hartmann and Siegrist, 2017). Therefore, there seems to be a need for public policies that improve consumers' understanding of environmental issues. Even if there is still a great deal of nuance in the scientific literature, several global tendencies are well supported, such as the high contribution of animal-based ingredients to the environmental impacts of food products. Other examples could be the importance of optimizing shopping trips that require the use of a vehicle, eating leftovers, or optimizing the use time of electrical devices. Improved dissemination of knowledge on these issues could benefit consumers' understanding of their own environmental impacts. Food companies could also be encouraged to communicate about good environmental practices related to the use of their products such as avoiding unnecessary oven pre-heating.

3.6.3. Recommendations for future LCA

Currently, assessments of the environmental impacts of a food product often exclude the steps occurring after purchase. However, our results demonstrate that consumer practices can have a large influence on a product's environmental impacts. Therefore, the inclusion of these steps in future LCA studies of food products could enable more realistic modeling of environmental performance.

Another important finding of this study is that there is a considerable amount of variability in consumer practices related to food production and consumption, which must be kept in mind

when analyzing the results of a food product LCA. Here, we limited ourselves to examining different consumer practices and did not analyze variability in industrial practices, which could be an interesting avenue for future study. This type of research would facilitate more-realistic comparisons of industrial and homemade food products. In addition, this study highlighted a gap between published cooking instructions and the real-world practices of consumers, especially regarding the cooking step (oven was generally used longer than the recommended time). Models that are based on recommended cooking times from a manufacturer may thus underestimate the effects of home cooking on the environmental impacts of a product.

Another aspect in which variability among consumers had a notable influence on the results was related to the transportation of the pizza or its ingredients from the place of purchase to the home. As yet, there is no consensus on the best allocation option for the domestic transportation of food products. Further research on this topic could be useful in determining recommendations for the preferred allocation.

Finally, we observed different results depending on whether we used a functional unit of one pizza or 1 kg of pizza. Therefore, we believe that it could be useful to calculate LCA with different FUs when comparing the environmental impacts of two food products (especially when the products have significant weight differences). Such an analysis could help prevent misleading conclusions and lead to a better understanding of the origin of the differences observed.

4. Conclusion

This study demonstrates that different stages of a pizza's life cycle after its purchase by a consumer in a supermarket can make a significant contribution to its environmental impacts and therefore should not be neglected. Indeed, the cooking step was the main hotspot for two of the environmental indicators examined here, while transport from the supermarket to the home was the main hotspot for another. For the other 10 environmental indicators analyzed in this study, agricultural production was the main hotspot. One of our main findings is that certain consumer practices were highly variable and this variability had a significant influence on the environmental impacts of the product. A comparison of the environmental effects of pizzas produced with different manufacturing processes (industrial, assembled at home, homemade) revealed that there were no major differences with respect to the environmental indicators studied here. Nevertheless, homemade pizzas tended to have a stronger impact than the other products on electricity-sensitive indicators; this makes sense because in this study the homemade pizzas required more electrical energy than the others. Instead, indicators that are more sensitive to the agricultural phase were more strongly affected by variations in ingredients and the proportions of ingredients.

This study represents a first step toward understanding the contribution of consumer practices to the environmental impacts of food products. Our data were obtained using questionnaires, and although we made an effort to be as comprehensive as possible in their design, it is

possible that they may have contained inaccurate information (e.g., errors, misunderstanding of the question, social desirability bias, etc.). In future research, it would very interesting to address this issue by carrying out measurements directly in participants' homes. Likewise, here the consumption values were estimated, but on-site measurements would allow us to obtain more reliable and precise values. Finally, it could be illuminating to complement analyses of variation in consumer practices with assessments of variability in manufacturing practices.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

This work was supported by ANR-IC-Qualiment through the TransfoQuaPe project. The authors would like to thank David Forest for his help during the experiment and Lindsay Higgins from English Services for Scientists for professional revision of the English.

CRedit authorship contribution statement

Adeline Cortesi: Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft. Marine Colpaert: Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – review & editing. Anne Saint-Eve: Conceptualization, Methodology, Resources, Funding acquisition, Writing – review & editing. Bastien Maurice: Methodology, Formal analysis, Resources, Writing – review & editing. Gwenola Yannou-Le Bris: Methodology, Formal analysis, Writing – review & editing. Isabelle Souchon: Conceptualization, Methodology, Funding acquisition, Writing – review & editing. Caroline Pénicaud: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing – review & editing, Supervision.

References

- 2013/179/EU: Commission Recommendation of 9 April 2013 on the use of common methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations Text with EEA relevance, 2013.
- ANSES, 2017. Etude individuelle nationale des consommations alimentaires (INCA 3).
- ADEME, 2017. Les avis de l'ADEME. Alimentation – Les circuits courts de proximité [Online]. Available https://bibliothèque.ademe.fr/consommer-autrement/1883-alimentation-les-circuits-courts-de-proximite.html#/44-type_de_produit-format_electronique (Accessed 05 May 2022).
- ADEME, 2020. Réduire le gaspillage alimentaire [Online]. Available <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/passer-a-l'action/eviter-production-dechets/dossier/reduire-gaspillage-alimentaire/enjeux> (Accessed 06 May 2022).
- Camilleri, A.R., Larrick, R.P., Hossain, S., Patino-Echeverri, D., 2019. Consumers underestimate the emissions

associated with food but are aided by labels. *Nature Clim Change* 9, 53–58. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0354-z>

Adjibade, M., Mariotti, F., Leroy, P., Souchon, I., Saint-Eve, A., Fagherazzi, G., Soler, L.-G., Huneau, J.-F., 2022. Impact of intra-category food substitutions on the risk of type 2 diabetes: a modelling study on the pizza category. *Br J Nutr* 127, 1240–1249. <https://doi.org/10.1017/S0007114521002130>

Campbell J., Macdiarmid J.I., Douglas F., 2016. Young people's perception of the environmental impact of food and their willingness to eat less meat for the sake of the environment: a qualitative study. *New technology in nutrition research and practice*, 75 (OCE 3). <https://doi.org/10.1017/S0029665116002391>

Cerema, 2020. Mobilité et commerces: Quels enseignements des enquêtes déplacements ? [Online] Available <https://www.cerema.fr/fr/actualites/mobilite-commerces-quels-enseignements-enquetes-deplacements> (Accessed 05 May 2022).

Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022a. Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market. *Journal of Cleaner Production* 336, 130128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130128>

Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022b. Life cycle inventory and assessment data for quantifying the environmental impacts of a wide range of food products belonging to the same food category: A case study of 80 pizzas representatives of the French retail market. *Data in Brief* 41, 107950. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107950>

Cucurachi, S., Scherer, L., Guinée, J., Tukker, A., 2019. Life Cycle Assessment of Food Systems. *One Earth* 1, 292–297. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.014>

Dijkman, T.J., Basset-Mens, C., Antón, A., Núñez, M., 2018. LCA of Food and Agriculture, in: Hauschild, M.Z., Rosenbaum, R.K., Olsen, S.I. (Eds.), *Life Cycle Assessment: Theory and Practice*. Springer International Publishing, Cham, pp. 723–754.

Dollé, J.-B., Agabriel, J., Peyraud, J.-L., Faverdin, P., Manneville, V., Raison, C., Gac, A., Le Gall, A., 2011. Greenhouse gases in cattle breeding: evaluation and mitigation strategies. *Inra Prod. Anim.* 24, 415–431.

EN ISO 14044, 2006. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines (ISO 14044:2006)

Energy UK, 2022. Electricity generation [Online]. Available. [https://www.energy-uk.org.uk/our-work/generation/electricity-generation.html#:~:text=Most%20of%20the%20UK's%20electricity,\(3.1%25%20in%202016\)](https://www.energy-uk.org.uk/our-work/generation/electricity-generation.html#:~:text=Most%20of%20the%20UK's%20electricity,(3.1%25%20in%202016)) (Accessed 04 May 2022).

Esmailpour M., Rajabi A., 2018. The effect of environmental-friendly attitude on consumer perception of usability of product packaging. *Journal of applied packaging research*.

Frankowska A., Schmidt Rivera X., Bridle S., Rodrigues Gladino Kluczkowski A.M., Tereza da Silva J., Martins C.A., Rauber F., Levy R. B., Cooki J., Reynolds C., 2020. Impacts of home cooking methods and appliances on the GHG emissions of food. *Nature food*. Brief communication. <https://doi.org/10.1038/s43016-020-00200-w>

Frischknecht, R., Braunschweig, A., Hofstetter, P., Suter, P., 2000. Human health damages due to ionising radiation in life cycle impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 20, 159–189. [https://doi.org/10.1016/S0195-9255\(99\)00042-6](https://doi.org/10.1016/S0195-9255(99)00042-6)

Gruber L.M., Brandstetter C.P., Bos U., Lindner J.P., Albrecht S., 2016. LCA study of unconsumed food and the influence of the consumer behavior. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 773–784. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0933-4>

INSEE (Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques), 2019. Conditions de vie Société, in INSEE, *Tableau de l'économie française*, Montrouge (France), INSEE, pp. 71–105.

- Hartmann C., Siegrist M., 2017. Consumer perception and behavior regarding sustainable protein consumption: A systematic review. *Trends in Food Science and Technology* 61, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.006>
- Lea, E., Worsley, A., 2008. Australian consumers' food-related environmental beliefs and behaviours. *Appetite* 50, 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2005.07.012>
- Le Moal, M., Gascuel-Oudou, C., Ménesguen, A., Souchon, Y., Étrillard, C., Levain, A., Moatar, F., Pannard, A., Souchu, P., Lefebvre, A., Pinay, G., 2019. Eutrophication: A new wine in an old bottle? *Science of The Total Environment* 651, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.139>
- Macdiarmid, J.I., Douglas, F., Campbell, J., 2016. Eating like there's no tomorrow: Public awareness of the environmental impact of food and reluctance to eat less meat as part of a sustainable diet. *Appetite* 96, 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.10.011>
- Matar, C., Guillard, V., Gauche, G., Costa, S., Gontard, N., Guilbert, S., Gaucel, S., 2020. Consumer behaviour in the prediction of postharvest losses reduction for fresh strawberries packed in modified atmosphere packaging. *Postharvest Biol. Technol.* 163, 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111119>
- Mills S.D.H., Wolfson J.A., Wrieden W.L., Brown H., White M., Admas J., 2020. Perceptions of 'Home Cooking': A qualitative analysis from the United Kingdom and United States. *Nutrients* 12, 198. <https://doi.org/10.3390/nu12010198>
- Ministère des solidarités et de la santé, 2019. Programme national nutrition santé 2019–2023.
- PIC International, 2020. La croissance retrouvée du marché de la pizza - News commerce 701 [Online]. Available. <https://www.pic-inter.com/actualites-commerce/news-commerce/la-croissance-retrouvee-du-marche-de-la-pizza-701.html> (Accessed 9 February 2021).
- Pinto, V.R.A., Campos, R.F. de A., Rocha, F., Emmendoerfer, M.L., Vidigal, M.C.T.R., da Rocha, S.J.S.S., Lucia, S.M.D., Cabral, L.F.M., de Carvalho, A.F., Perrone, Í.T., 2021. Perceived healthiness of foods: A systematic review of qualitative studies. *Future Foods* 4, 100056. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2021.100056>
- Pointereau, P., Baudry, J., Couturier, C., Kesse-Guyot, E., Hamon, X., Hercberg, S., Luzzi, H., Lairon, D., Langevin, B., Le Manach, F., Seconda, L., 2019. Le revers de notre assiette : Changer d'alimentation pour préserver notre santé. Solagro.
- United Nations, 2020. Sustainable development GOALS [Online]. Available. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (Accessed 28 July 2021).
- Ribeiro P.J.G., Fonseca F., 2022. Students' home-university commuting patterns: A shift towards more sustainable modes of transport. Case studies on transport policy. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.03.009>
- Román, S., Sánchez-Siles, L.M., Siegrist, M., 2017. The importance of food naturalness for consumers: Results of a systematic review. *Trends in Food Science & Technology* 67, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.010>
- RTE, Le réseau de transport d'électricité, 2021. Bilan électrique 2020 [Online]. Available. https://assets.rte-france.com/prod/public/2021-03/Bilan%20electrique%202020_0.pdf (Accessed 04 May 2022).
- Sala S., Cerutti A.K., Pant R., 2018. Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-68042-7, EUR 28562. <https://doi.org/10.2760/945290>
- Sonesson, U., Mattsson, B., Nybrant, T., Ohlsson, T., 2005. Industrial processing versus home cooking: an environmental comparison between three ways to prepare a meal. *Ambio* 34, 414–421. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-34.4.414>
- Tukker A., Huppes G., Geerken T., Nielsen P., 2006. Environmental Impact of Products (EIPRO): Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25. Technical Report Series.

Weidema, B.P., M. Wesnæs, J. Hermansen, T. Kristensen, and N. Halberg. 2008. In Environmental improvement potentials of meat and dairy products, eds. Eder, P. and L.

3.3 CONCLUSION DU CHAPITRE 3

L'article 3 a mis en relief l'importance de prendre en compte les étapes ayant lieu après l'achat du produit au supermarché dans l'évaluation de la performance environnementale des produits alimentaires. En effet, la variabilité des pratiques des consommateurs peut être à l'origine de variations importantes d'impacts environnementaux entre les pizzas, en particulier pour certains indicateurs environnementaux. De plus, il a été montré que les pizzas faites maison étaient globalement plus appréciées et perçues comme étant meilleures pour l'environnement et la santé que les pizzas industrielles. Or, les résultats obtenus par ACV ont montré que les pizzas faites maison n'étaient pas forcément meilleures d'un point de vue environnemental que les pizzas industrielles et pouvaient même être pires pour certains indicateurs. Ceci met en évidence que, bien que l'appréciation des pizzas semble être positivement corrélée à leur qualité environnementale telle que perçue par les consommateurs, cette corrélation n'est plus vraie en se basant sur les résultats d'ACV. Ainsi, les impacts environnementaux ne semblent pas corrélés, ni positivement, ni négativement à l'appréciation des pizzas par les consommateurs. Ceci montre que, comme pour cela avait été discuté dans le chapitre 2 concernant la dimension nutritionnelle, la prise en compte simultanée des dimensions environnementale et sensorielle peut nécessiter de trouver les meilleurs compromis.

Cette étude a également permis de mettre en évidence des implications relatives à la méthodologie ACV et en particulier au choix de l'UF à utiliser pour la comparaison de produits alimentaires d'une même catégorie. En effet, la comparaison des 6 pizzas a montré que les conclusions pouvaient parfois varier selon l'UF utilisée (UF= 1 pizzas vs UF=1kg de pizza), ce qui montre l'importance du choix de l'unité fonctionnelle mais aussi la nécessité de prendre du recul vis-à-vis de résultats obtenus avec une seule unité fonctionnelle.

CHAPITRE 4 : PRISE EN COMPTE DE LA DIMENSION NUTRITIONNELLE DANS L'ACV DES PRODUITS ALIMENTAIRES D'UNE MEME CATEGORIE (ARTICLE 4)

Les résultats d'ACV présentés au sein des chapitres 2 et 3 présentent une limite importante. En effet, l'unité choisie pour les études présentées dans le chapitre 2 est, comme dans la plupart des études ACV dédiées à l'étude des produits alimentaires, basée sur une masse de produit. Dans le chapitre 3, deux UF ont été utilisées : une basée sur une pizza et une basée sur 1kg de pizza et les résultats obtenus montrent que le choix de l'UF peut avoir une influence importante sur les résultats obtenus. Dans tous ces cas, on peut dire que la fonction de l'aliment n'est pas représentée à travers ces UF, ce qui devrait pourtant être le cas compte tenu de la définition de l'unité fonctionnelle telle que présentée dans la norme ISO 14040 présentée dans le chapitre

1. Pour cette raison, dans ce chapitre, les résultats d'ACV obtenus au cours du chapitre 2 (pour 80 pizzas d'une part et 44 fromages d'autre part) à partir d'une UF massique seront étudiés au travers d'UF nutritionnelles plus représentatives de la fonction du produit. Ainsi, nous faisons l'hypothèse que l'utilisation d'UF nutritionnelles permette de rendre compte plus justement de la qualité environnementale des produits alimentaires d'une même catégorie grâce à une meilleure représentation de leur fonction. Par ailleurs, nous faisons également l'hypothèse que l'inclusion de la dimension nutritionnelle au sein de l'UF lors de la réalisation d'une ACV puisse constituer un bon moyen de coupler ces deux dimensions pouvant être parfois contradictoires comme discuté dans le chapitre 2. Ainsi, ce chapitre a plusieurs objectifs :

- Tester la robustesse des conclusions établies sur la base d'une UF massique (chapitre 2) en les comparant aux résultats obtenus en utilisant des UF nutritionnelles.
- Apporter des éléments sur les choix d'UF à faire pour évaluer le plus pertinemment possible la performance environnementale des produits alimentaires.
- Identifier dans quelle mesure inclure la dimension nutritionnelle dans l'UF de l'ACV est un bon moyen de coupler les dimensions environnementale et nutritionnelle (Figure 4.1).

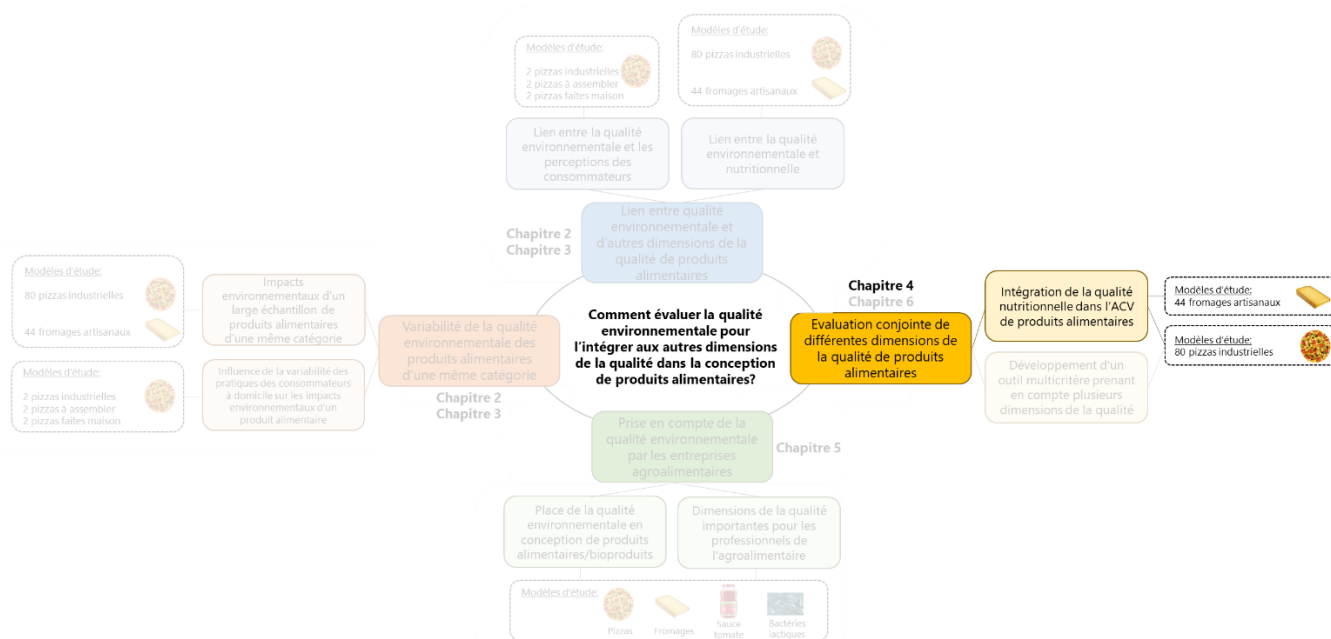


Figure 4.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 4

4.1 RESUME

La norme ISO 14044 stipule que les calculs d'ACV doivent être basés sur une unité fonctionnelle (UF) représentative de la fonction du produit. Néanmoins, la plupart des ACV des produits alimentaires sont basées sur une masse de produit, n'étant ainsi pas représentative de sa fonction. Cette étude vise à évaluer l'influence de l'utilisation de différentes UF nutritionnelles

sur le classement des impacts environnementaux des produits d'une même catégorie. Pour ce faire, différentes UF ont été utilisées pour évaluer les impacts environnementaux de grands échantillons de produits alimentaires appartenant à la même catégorie d'aliments : 80 pizzas industrielles et 44 fromages artisanaux. Trois UF ont été utilisées pour les deux catégories d'aliments : une UF basée sur la teneur en énergie du produit, une UF basée sur la teneur en protéines, et une UF basée sur un score nutritionnel français (SAIN). Trois UF supplémentaires ont été utilisées pour les pizzas : une UF basée sur la teneur en fibres, une UF combinée basée sur les teneurs en protéines et en fibres, et une UF basée sur la portion recommandée. De même, deux UF supplémentaires ont été utilisées pour les fromages : une UF basée sur la teneur en calcium et une UF combinée basée sur les teneurs en protéines et en calcium. Les ACV ont été réalisées sur le logiciel SimaPro. Ensuite, l'évolution du classement des 80 pizzas d'une part et des 44 fromages d'autre part en fonction de leur impacts environnementaux calculés avec les différentes UF a été étudiée. Les résultats ont montré que l'utilisation des différentes UF avait un effet sur le classement des impacts environnementaux des différents produits, aussi bien pour les pizzas que pour les fromages. Globalement, il a été observé que plus l'utilisation d'une UF non massique remplit les conditions suivantes, plus son utilisation modifiera le classement établi avec une UF massique : la variation d'impacts environnementaux plutôt faible entre les produits lorsque ces derniers sont calculés avec une UF massique, le nutriment sur lequel l'UF est basée est davantage concentré dans les produits ayant le plus d'impacts calculés avec une UF massique, la dispersion de la teneur en nutriments entre les différents produits étudiés est forte. Les résultats ont montré qu'il n'y avait pas d'UF préférentielle pour comparer les impacts environnementaux de produits alimentaires appartenant à la même catégorie d'aliments (dans ce cas, les fromages et les pizzas), chacune des UF étudiées apportant des informations différentes. Par conséquent, il peut être approprié d'utiliser plus d'une UF pour parvenir à une meilleure compréhension des impacts environnementaux d'un produit. Cependant, nous avons vu que les résultats peuvent être contradictoires selon l'UF utilisée, ce qui peut conduire à une interprétation difficile pour les parties prenantes.

4.2. ARTICLE 4 : NUTRITIONAL LCA CAN HELP TO BETTER COMPARE THE ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF FOOD PRODUCTS BELONGING TO THE SAME CATEGORY.

Article en cours de préparation pour une soumission envisagée à **The international journal of life cycle assessment.**

Nutritional LCA can help to better compare the environmental performance of food products belonging to the same category

Adeline Cortesi¹, Gwenola Yannou-Le Bris¹ and Caroline Pénicaud¹

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

Abstract

Purpose: ISO 14044 norm indicates that LCA calculation are supposed to be based on a functional unit (FU) representative of the product function. Nevertheless, most LCA of food products are based on a mass of product which is not representative of the food function. This study aims to evaluate the influence of the use of different nutritional FUs on the comparison of the environmental performance of different food products from the same food category.

Methods: To do so, different FUs were used to conduct the LCA of large samples of food products belonging to the same food category: 80 industrial pizzas and 44 artisanal cheeses. The FU used for both food categories were: energy content, protein content and a French nutritional index (SAIN). The FU used only for pizzas were fiber content, a combined FU based on both protein and fiber contents, and the portion size. The FUs used only for cheeses were calcium content and a combined FU based on protein and calcium contents. LCA were performed on SimaPro software. Then, the evolution of the ranking of the 80 pizzas on the one hand and the 44 cheeses on the other hand based on their impacts on climate change calculated with the different FU were studied. Results presented in this paper focus on the climate change indicator. However, the influence of the different FUs were also studied on other environmental indicators which are discussed in the discussion section.

Results and discussion: The use of nutritional FU does have an effect on the ranking of the food products based on their impact on climate change, for both pizzas and cheeses. However, this influence is not necessary the same for all environmental indicators studied. However, it can be said that including nutritional characteristics of products into the FU is an interesting way of combining the environmental and nutritional dimensions. Globally, the more the use of a nutritional FU meet the following conditions, the more influence it will have on the ranking of the different products studied compared to the ranking established with a mass FU: Rather low variation of environmental impacts between products when using a mass-based FU, richness of the products with the highest environmental impacts (mass-FU) in the nutriment used in the FU, and strong dispersion of the nutrient content among the different products studied.

Conclusions: There is no preferred FU for comparing the impacts on climate change of food products belonging to the same food category (in this case pizzas and cheeses), each one brings out different information. The FU selection must be in accordance with the goal of the

study, as well as the stakeholders involved and the target population. However, it may be appropriate to compare the results obtained with different FU in order to achieve a better understanding of the environmental performance of the products. Nevertheless, the results can be contradictory depending on the FU used which can lead to a difficult interpretation for stakeholders, especially if the goal is to select a best option or to communicate.

Keywords : functional unit, environment, nutrition, food category, climate change

1. Introduction

LCA is a standardized multi-criteria and multi-stage method for assessing the environmental impacts of a system over its entire life cycle (EN ISO 14044, 2006). The realization of an LCA requires the definition of a functional unit (FU). This FU is supposed to be a reference unit representing the function of the system assessed (EN ISO 14044, 2006). Therefore, it is especially important that the choice of the FU is consistent with the goal of the study. The FU is used to define a reference flow that corresponds to the output flows required to perform the function as expressed by the functional unit (EN ISO 14044, 2006). Therefore, the selection of the FU is particularly important because all input and output calculations related to the life cycle inventory will be performed on the basis of the reference flow associated with this FU. This allows the comparison of two systems on the basis of an equivalent service provided. However, the representativeness of the system function within the FU is limited in the case of food products. Indeed, the LCA of food products are most of the time performed using a mass-based or a volume-based FU. Nevertheless, it is obvious that the function of a food product goes far beyond its mass or volume. Furthermore, the use of a mass-based FU favors intensive productions independently of the quality of the final product.

In order to deal with this limitation, some authors proposed to use non-mass-based FU for food products LCA. The most commonly used non-mass FUs for assessing the environmental impacts of food products are nutritional FUs, based on the assumption that nutrition is the main function of food. Several studies have used a FU based on the energy content of food products (McAuliffe et al., 2020). Whereas this FU is quite easy to use, the choice of a FU based on energy content is however limited because it reduces the food quality to its energy content (McLaren et al., 2021). FUs based on a single nutritional component have also been studied by several authors. According to the literature review by Grigoriadis et al. (2021), the nutrient that is most commonly used to define a FU is protein. Protein-based FUs have primarily been used to compare the environmental impacts of different protein foods. For example, Oonincx and Boer (2012) used it to compare the environmental impacts of mealworms to different meats and Saarinen et al. (2017) to compare the environmental impacts of different protein sources from both animal (e.g., egg, sausage) and plant (e.g., pea, soy, kidney beans) origins. Different nutritional quantities were also used as FUs. Polyunsaturated fatty acids, cis-monounsaturated fatty acids, iron, and calcium contents were used as FUs to compare the environmental impacts

of different protein rich foods (Saarinen et al., 2017). Omega 3, meanwhile, has been used as a FU to compare the environmental impacts of different meats (McAuliffe et al., 2018) as well as eggs and salmon (Salazar et al., 2019). Also, carbohydrate content has been used as a FU to compare the environmental impacts of different carbohydrate-rich foods such as grains and tubers (Xu et al., 2018). The use of a FU based on a single nutrient could be useful when the food product is intended for a population deficient in this nutrient for example. However, using a single nutrient as a FU reduces the nutritional quality of a food product to this nutrient. Therefore, some authors used a FU based on a nutritional index in order to include simultaneously different nutrient contents in the FU. For example, the FNI_{prot7} index, a nutritional index especially designed for protein sources including 7 nutrients to favor, and the NRF9, a nutritional index including 9 nutrients to favor, were used to compare the environmental performances of 29 protein-rich products (Saarinen et al., 2017). In addition, some authors have pointed out that the quantity of a nutrient does not guarantee its quality and they proposed FUs that reflect more on their quality. This is the case, for example, of Berardy et al. (2019) who integrated the quality of proteins through the DIAAS (digestible indispensable amino acid score). Digestible lysine mass (Moughan, 2021) as well as digested protein dry matter (Smetana et al., 2015) were also used. Sonesson et al. (2019) also proposed a FU that includes dietary background within the FU. Although these FUs are of interest, their use is often limited by a lack of data (McLaren et al., 2021). This shows the wide variety of nutritional FUs that can be used in order to study the environmental impacts of food products. However, the selection of the FU can have a strong influence on the results and that is why it should be selected carefully based on the objective of the study. In all, it has been shown that the use of a non-mass FU can significantly alter the conclusions obtained with a mass-based FU, especially when the objective of the study is to compare different food items. For example, Masset et al. (2015), who compared 373 food items, concluded that when greenhouse gas emissions were expressed per 100g of food product, foods with low greenhouse gas emissions tended to have a good nutritional quality. On the contrary, when a FU based on 100kcal was used to assess the GHG emissions, foods with the lowest emissions also tended to have a lower nutritional quality. Indeed, with a FU of 100g, meat and dairy products tend to emit the most greenhouse gases whereas with a FU of 100kcal, fruits and vegetables tend to generate more emissions than dairy products as well as meat (except ruminant meat).

Some studies use non-mass FUs to compare different food products from the same food group. This is the case for example of Xu et al. (2018) who used different FUs (such as mass, energy, protein and carbohydrate contents) to rank 19 different carbohydrate-rich foods such as potatoes, beans and cereal products. Nutritional FU can also be used to compare the environmental impacts of food products within a same food product category. For example, Teixeira et al. (2013) used a mass FU, an energy FU and a protein FU to compare the environmental impacts of different French pork patés. In this example, it was shown that when using a protein-based FU, the pâté with the highest protein content become the less impacting one, which was not the case when using a mass-based FU. This shows how the conclusions can be totally modified depending on the FU used. However, in this example, the number or

products studied is relatively low and to date, no study has investigated the influence of using nutritional FUs on the comparison of the environmental performances of a large number of food products belonging to the same category. However, understanding the influence of the use of different FUs on the ranking of the environmental impacts of a large number of products belonging to the same category can be useful for several reasons: This would allow us to see if the differences generated by the use of a nutritional FU on a small number of products from the same category are confirmed over a larger range. It can also help to determine the extent to which the use of a nutritional FU will have a significant influence on the ranking of different products. For these reasons, the objective of the present study was to understand the influence of the use of different nutritional FUs on the ranking of a large samples of food products from the same category. It was also to investigate what might be the most relevant choice of FU, or more likely of combination of FUs, for a study whose objective is to compare the environmental impacts of products from the same category. Another objective was to understand if the use of nutritional FUs in LCA can be a good way to combine nutrition and environment in the assessment of the performance of food products within a same category. In order to see if the findings differ depending on the food category, two different food categories were studied: the pizzas and the cheeses. These two categories were chosen for different reasons. The first one is that they are particularly popular food categories in France. Indeed, France is the world's largest consumer of pizza per capita (on par with the United States), with an estimated consumption of 10kg per person in 2020 (PIC International, 2020). Cheeses are also highly consumed products in France, with an average of 27.4kg consumed per capita in 2020 (CNIEL, 2022). The second one is that cheeses are food products derived from the processing of one main ingredient, milk, while pizzas are food products derived from the processing of several ingredients. We therefore wanted to investigate whether this difference could be the cause of variation in the findings. The third one is that the pizzas and the cheeses are two food product categories with a high product variability in recipes and in processing, which makes them prone to show differences in environmental impacts from one product to another. We have already shown this by studying the environmental impacts of 80 pizzas and 44 cheese using a mass-based FU (Cortesi et al., 2022a; Cortesi et al., 2022b). These previous studies therefore provide substantial data support for the work presented in this paper (Cortesi et al., 2022c; Cortesi et al., 2022d).

2. Methods

2.1. Products choice and mass based LCA

The chosen products are 80 industrial pizzas representative of the French retail market and 44 PDO artisanal cheeses. Information related to the 80 pizzas are available in (Cortesi et al., 2022c) and information related to the 44 cheeses are available in (Cortesi et al., 2022d), as well as their

environmental impacts assessed by LCA using a mass-based FU. Both for the 80 pizzas and the 44 cheeses, the LCA were performed on the Simapro software using the "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set" characterization method. In the case of cheeses, the environmental impacts values were assessed for two ripening scenarios: a base scenario in which the cheeses are ripened in a small on-site ripening room and an alternative scenario in which the cheeses are ripened in a large off-site shared ripening room. The main difference between these two scenarios is that the electrical consumption per kg of ripened cheese is lower for the alternative scenario than for the base scenario. These two scenarios will be investigated in the current study.

2.2. Choice of the non-mass-based FU

The FUs studied are not the same for pizzas and cheeses. Table 1 summarizes all of the non-mass FUs studied in this article as well as the product category of products (pizzas or cheeses) on which they were applied.

Table 1. Non-mass-based FU calculated in this study and sample applied on

	80 industrial pizzas	44 French PDO cheeses
FU energy	X	X
FU protein	X	X
FU fiber	X	
FU calcium		X
FU protein + fiber	X	
FU protein + calcium		X
FU nutritional index (SAIN)	X	X
FU portion size	X	

The energy FU was used for both food categories because it is the most commonly used nutritional FU identified in the literature. Protein FU was also selected for both pizza and cheese categories for two reasons. On the one hand it is the nutrient that is the most frequently used among FUs based on a single nutrient and on the other hand, cheeses and pizzas can both have interesting protein contents. Fibre FU was selected for pizzas because they are nutrients to favor according to the French nutritional recommendation (Ministère des solidarités et de la santé, 2019) and because pizza can have interesting fibers contents due to the high percentage of dough. However, fiber FU was not used for the cheese category because cheeses do not contain any fiber. Similarly, the FU protein+fiber was not used for the cheese category either but only for the pizza category. Instead, a FU calcium and the FU protein+calcium were used for the cheese category because cheeses are known to be rich in this calcium. The nutritional index SAIN was used for both pizza and cheese categories in order to include different nutrients to favor at the same time in the FU. This nutritional index was especially selected because it includes only nutrients to favor, as recommended by Saarinen et al (2017) et McLaren et al. (2021). An associated score (LIM) reflecting the food product contents in

nutrients to limit was calculated in addition in order to discuss the results obtained with the SAIN FU. Finally, a FU based on the portion size was calculated only for the pizza category because their packaging indicates a portion that is recommended to be consumed, which is not the case for the cheeses studied.

2.3. Nutrient profile calculation

2.3.1. Nutritional values

The nutritional characteristics of the pizzas in relation to their energy, protein and fiber contents were taken from the data paper associated with the 80 pizzas (Cortesi et al., 2022a). The energy, protein and calcium contents of the cheeses were found in the CIQUAL table (The French reference database on the nutritional composition of foods produced and updated by the French National Food Safety Agency (ANSES)). In the rare cases of a needed data was not available in the CIQUAL database, the nutritional data of a similar cheese was selected instead.

2.3.2. SAIN index calculation

The SAIN indicator is a French nutritional density index including different nutrients to favor for a balanced diet. Equation 1 shows the calculation used to assess the base SAIN score of the pizzas. It corresponds to the SAIN calculation used for the nutritional profiling SENS system.

$$SAIN_{pizza} = \frac{\left(\frac{fruits\ and\ vegetables\ (g/g)}{10} + \frac{proteins\ (g/100kcal)}{50} + \frac{fiber\ (g/100kcal)}{20} \right)}{4} * 100$$

Equation 1. Nutritional indicator SAIN calculation used for pizzas (Tharrey et al., 2017)

Equation 2 shows the calculation used to assess the SAIN score of cheeses. Indeed, for cheeses, the calcium content is added in the calculation of the base SAIN (Tharrey et al., 2017). We also deleted the fruits and vegetables as well as the fiber contents from the equation because cheeses do not contain any.

$$SAIN_{cheese} = \frac{\left(\frac{proteins\ (g/100kcal)}{50} + \frac{calcium\ (mg/100kcal)*2}{800} \right)}{4} * 100$$

Equation 2. Nutritional indicator SAIN calculation used for cheeses (Tharrey et al., 2017)

For both equations (Equation 1 and Equation 2), the numbers under each nutrient content refers to the recommended daily intake of this nutrient (Tharrey et al., 2017).

The LIM score which includes nutrients to limit for a balanced diet was also calculated, using Equation 3.

$$LIM = \frac{\left(\frac{\text{sodium (mg/100g)}}{2400} + \frac{\text{saturated fatty acids (g/100g)}}{20} + \frac{\text{free sugar (g/100g)}}{50} \right)}{3} * 100$$

Equation 3. Nutritional indicator LIM calculation

2.4. Portion size calculation

The pizzas studied vary in their sizes but also in their recommended portions. Thus, some are individual pizzas while others are supposed to be shared. The packaging recommends to consume 1/2, 1/3 or 1/4 per person depending on the pizza. The recommended pizza portion sizes were determined based on the indications on the pizza packaging and the associated masses were then calculated. For the pizzas that do not have a recommended portion size indicate on their packaging, the serving size was estimated based on the recommended serving size indicated on a similar pizza's packaging.

2.5. Calculation of the reference flows corresponding to the different FUs

2.5.1. FU based on energy or single nutritional component

For FUs based on the energy, protein, fiber, and calcium contents, the LCA values calculated for a 1kg FU were divided by the amount of energy, protein, fiber, and calcium available in 1kg of product. This calculation allows to obtain the environmental impacts associated with the mass of product (reference flow) that one needs to consume in order to ingest 1kcal or 1g of protein, fiber, or calcium.

2.5.2. Combined FU

The combined FU based on both protein and fiber contents was calculated as follows. First, the recommended daily intakes for these two nutrients were sought. Then, we assumed that the consumption of pizza constituted half a meal and should therefore provide 1/6 of the recommended daily intake (considering that there are three meals per day). The mass of pizza required to provide at least 1/6 of the recommended dietary allowance of both proteins and fibers was then calculated for each pizza. The impacts environmental impacts related to these reference flows for each pizza were then calculated. For example, if Xg of pizza are required to provide 1/6 of the recommended daily intake of proteins, that Yg of pizza are required to provide 1/6 of the recommended daily intake of fibers, and that X<Y, then Y will be used as the reference flow. The same calculation was done for the combined FU used for the cheeses, based on protein and calcium contents.

The same principle was applied for the combined FU protein+calcium used for the cheese category. In this case, we used the hypothesis that the portion of cheese consumed represent 1/18 of the total food consumed during the day.

2.5.3. FU based on the SAIN index

In order to calculate the environmental impacts with a FU based on the SAIN, the environmental impacts of 100g of product were divided by the SAIN score of the corresponding product.

2.5.4. FU based on portion size

For the portion size FU, the environmental impacts of the mass corresponding to the portion size of each pizza were calculated.

2.6. Statistical treatment of the results

Boxplots were performed in order to study the distribution of products impacts on climate change as well as the distribution of nutrient contents among products. These boxplots were performed using the XLStat software (version 2020, 5.1.1043). XLStat software was also used to study correlations using spearman tests.

3. Results

The results presented focus on the climate change indicator. We decided to focus on this indicator because it is the most commonly used in the literature of food LCA and also because it is considered as the most robust environmental indicator (Sala et al., 2018). However, the evolution of the pizzas ranking using different FUs was also studied for other environmental indicators. The differences observed between the climate change indicators and other environmental indicators will be discussed in the discussion section.

3.1. Pizzas

3.1.1. Evolution of the 80 pizzas' impacts on climate change ranking according to different FUs

In this section, the influence of the FU used on the ranking of the 80 pizzas according to their impacts on climate change is investigated. Figure 1 presents the ranking of the impacts on climate change of the 80 pizzas when assessed with a mass, energy, protein, fiber, protein+fiber, SAIN score and portion size FUs. In order to achieve this graphical representation, the 80 pizzas were firstly ranked according to their impacts on climate change assessed with a mass FU from the most impacting one to the least impacting one. Thus, the pizza ranked number 1 corresponds to the pizza with the lowest impacts on climate change when assessed with a mass FU, while the pizza ranked 80 is the most impacting one. Colors were also added: pizzas in green are the ones with the lowest impacts, using the mass-based FU, while those in red are the ones with the most impact. This numbering and color code are fixed for the pizzas whatever the FU used, which allows to observe the evolution of each pizza according to the different FUs. Then, for each FU, the pizza on the top of the Figure is the one with the lowest impacts on climate change when assessed with this FU and the pizza at the bottom of the Figure is the one with the highest impacts, no matter its number nor color.

Mass	Energy	Protein	Fiber	Protein + fiber	SAIN	Portion size
1	2	2	2	2	1	10
2	1	7	1	3	4	8
3	3	4	3	5	7	13
4	8	3	5	1	11	7
5	6	8	11	4	3	19
6	9	45	4	6	6	34
7	7	6	6	11	10	3
8	35	5	9	9	5	18
9	42	14	15	10	13	38
10	5	16	10	8	2	14
11	4	33	8	60	12	27
12	30	27	60	7	51	5
13	10	22	7	13	9	6
14	27	12	13	18	8	50
15	22	28	18	14	23	22
16	32	42	14	19	16	28
17	36	20	19	17	38	54
18	11	39	17	12	17	4
19	16	21	12	46	20	11
20	34	25	46	22	28	57
21	25	38	22	39	40	39
22	31	35	39	28	27	53
23	37	18	28	16	44	12
24	14	43	16	33	19	45
25	21	61	33	34	24	67
26	18	36	34	25	33	69
27	20	34	25	15	29	1
28	38	44	21	21	48	25
29	39	13	43	43	30	36
30	57	23	20	20	14	31
31	50	30	27	27	15	16
32	26	31	44	44	60	65
33	45	50	40	40	35	17
34	13	24	38	38	45	20
35	17	49	23	23	18	61
36	28	17	24	24	26	21
37	41	58	59	59	32	24
38	54	52	29	29	25	2
39	56	56	31	31	21	26
40	15	57	45	45	41	29
41	43	64	26	26	31	32
42	12	53	30	30	43	33
43	62	41	47	47	61	37
44	19	60	49	49	22	46
45	51	40	35	35	55	64
46	46	1	32	32	49	56
47	55	26	54	54	53	42
48	52	9	50	50	47	43
49	24	19	41	41	39	40
50	71	62	53	53	52	30
51	23	46	37	37	56	9
52	58	29	55	55	59	35
53	59	77	36	36	34	47
54	53	32	58	58	37	58
55	65	37	48	48	54	60
56	29	67	52	52	50	41
57	40	10	61	61	46	44
58	33	47	57	57	58	49
59	69	65	56	56	36	55
60	44	11	62	62	63	48
61	48	51	63	63	57	62
62	63	63	64	64	42	51
63	49	48	42	42	64	59
64	60	59	70	70	62	15
65	66	66	79	79	68	52
66	77	69	67	67	67	23
67	47	68	51	51	72	63
68	64	54	69	69	70	66
69	68	74	75	75	71	80
70	67	55	66	66	66	70
71	61	71	73	73	77	79
72	74	70	72	72	75	68
73	76	73	76	76	73	72
74	70	76	74	74	74	73
75	72	72	65	65	65	71
76	73	15	68	68	78	75
77	80	75	77	77	69	78
78	78	79	78	78	79	74
79	75	78	71	71	76	77
80	79	80	80	80	80	76

Figure 1. Evolution of the ranking of the 80 pizzas according to their impacts on climate change calculated from different FU. Numbering and colors are defined according to the mass FU (low number and green color stand for low impacts, high number and red color stand for high impacts). Then for each FU, pizzas are ranked by impacts on climate change, from lowest (top) to highest (bottom).

According to Figure 1, it can be said that the use of a non-mass FU has an influence in the ranking of the 80 pizzas. Indeed, the ranking of the 80 pizzas is modified for all the FU tested compared to the ranking established with a mass FU. This is logical since the pizza contents are quite different from one pizza to another. For example, among all the pizzas, the energy contents go from 176kcal/100g to 354kcal/100g, the protein contents go from 5.2g/100g to 18.1g/100g and the fiber content go from 1.5 to 3.8. The SAIN score are also quite variable among pizzas (from 2.7 to 5.3), as well as the recommended portion (from 100g to 310g).

However the evolution of the ranking of the different pizzas does not induce a drastic reversal of the ranking established with a mass FU for extreme pizzas. Indeed, the red colored references of pizzas corresponding to the lowest ranked pizzas (i.e. pizzas with the highest impacts) with a mass FU are still at the bottom of the ranking with the other FUs. Similarly, the green colored pizzas corresponding to the highest ranked pizzas (i.e. pizzas with the lowest impacts) with the mass FU remain globally at the top of the ranking with the other FUs.

Furthermore, the use of the combined protein+fiber FU results in a ranking very close to the one obtained with the fiber FU. This is due to the fact that the mass of pizza necessary to reach 1/6 of the recommended daily intake in fibers is higher than that the mass necessary to reach 1/6 of the recommended daily intake in proteins for the vast majority of pizzas. Hence, fiber is the limiting nutrient and the ranking obtain using the fiber+protein FU is therefore similar to one obtained with the fiber FU.

The reference flow calculated for 1/6 of the recommended daily intakes in proteins and fibers were looked at. It appears that the highest reference flow (i.e. the mass of pizza needed to consume 1/6 of the daily recommended intake in protein) is 3.5time higher than the lowest one. For the fiber, the highest reference flow is 2.5time higher than the lowest one. This means that the reference flows are various but that they are globally quite close from each other. This could not be the case when comparing products from different product category. For example, Saarinen et al. (2017) compared the GHGE emission of different protein rich food products and concluded that, while the GHGE emissions related to some food products are lower than other, the wide difference of reference flow can make them difficult to compare in reality. For example, using a protein FU, peas have lower GHG emission than peas but to achieve a daily recommended consumption of proteins, 1.41kg of cooked dry peas are needed to be consumed while only 290g of beef. The fact that the reference flow differs by a factor 4.9 is a limit in the results. Indeed, in the reality of a diet, a person won't eat 4.9times more of a food product in order to obtain the same amount of nutrients, which make the authors reflect on the pertinence of the protein FU used. This might lead us to believe that the differences in reference flows can be less important when the comparisons concern products from the same product category, but this is not necessarily the case, as we will in the case of cheeses.

3.1.2. Influence of the FU used on the dispersion of the 44 cheeses impacts on climate change

The influence of the choice of FU on the dispersion of the calculated impacts on climate change

was also investigated. Figure 2 shows the dispersion of impacts on climate change for the 80 pizzas.

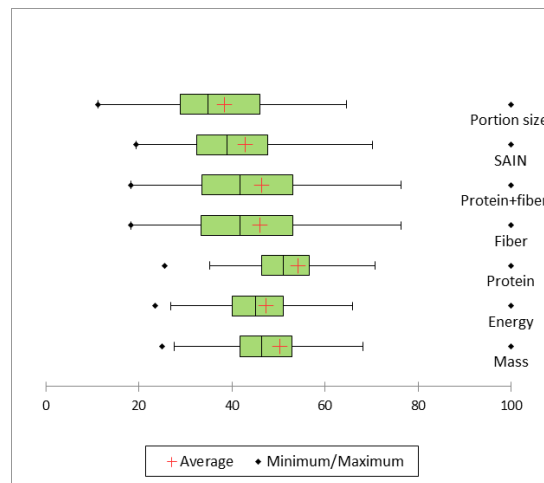


Figure 2. Evolution of the dispersion of impacts in climate change according to different FU used for the 80 pizzas

The distributions of climate change impacts of pizzas show little variation between the different FUs studied. although the distributions obtained with the fiber, protein+fiber, SAIN and portion size FUs tend to be a little wider than the distributions obtained with the mass, energy and protein FUs. Therefore, it can be said that, in the case of pizzas, changing the FU do not widely affect the importance of the differences of impacts on climate change between the pizzas.

3.1.3. Identification of the pizzas favored by the used of each FU

In order to better understand the ranking evolution observed in Figure 1, we studied the evolution of the ranking of different types of pizzas when using different FUs. To do so, the evolution of the rankings of the richest pizzas in energy, protein, fiber contents, and having the best SAIN score according to different FUs were studied. Figure 3 shows the evolution of the distribution of the rankings of the 10 richest pizzas in energy, the 10 richest pizzas in proteins, the 10 richest pizzas in fibers, the 10 pizzas with the best SAIN score, and the 10 pizzas with the lowest recommended portion according to different FUs.

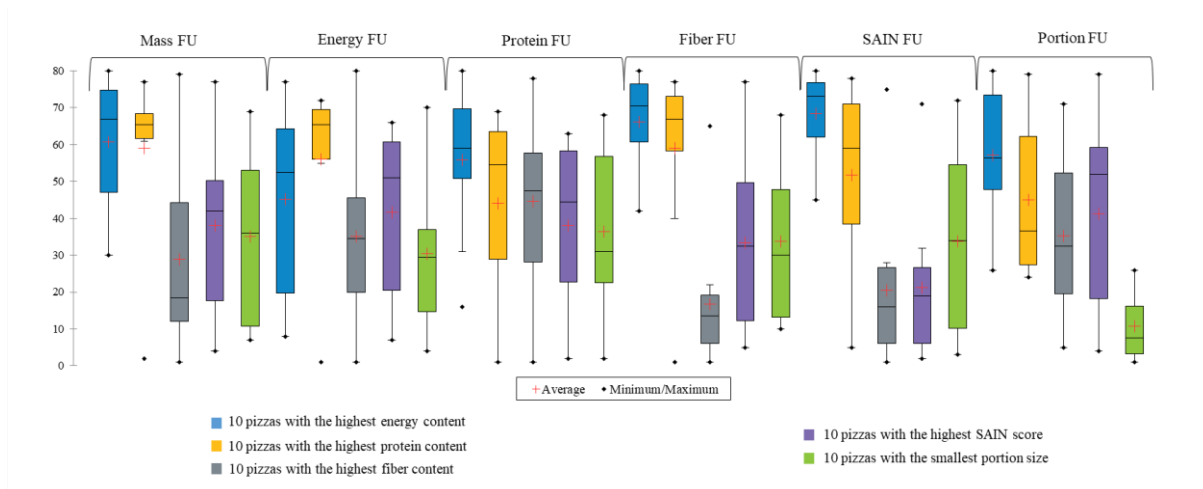


Figure 3. Boxplots representing the dispersion of the 10 pizzas with the highest contents in energy, protein, fiber, with the highest SAIN score, and with the smallest portion according to their impact on climate change assessed with different FUs.

First of all, according to Figure 3, several conclusions can be made regarding the mass FU. The ten pizzas with the highest energy content and the ten pizzas with the highest protein content tend to have globally worse rankings than the 10 pizzas with the highest fiber contents and the 10 pizzas with the best SAIN scores when using a mass FU. This makes sense because the pizzas with the highest impact on climate change are globally the ones containing beef and/or those with high cheese contents (Cortesi et al., 2022a). These ingredients are rich in kcal and proteins, which explains globally poor rankings of pizzas containing large quantities of them. On the opposite, pizzas containing less animal products and more vegetables and dough, and which are therefore richer in fibers, tend to be among the pizzas with the lowest impacts on climate change. This explains why richest pizzas in fibers have globally a better ranking than those rich in proteins or energy (kcal). The SAIN score includes proteins, and fibers contents as well as the fruits and vegetables content. The fact that the fiber and the fruits/vegetables contents are included in the SAIN explains why the pizzas with the best SAIN scores tend to have a better ranking than the 10 richest pizzas in proteins. The fact that the SAIN score includes protein and fiber explains why the 10 pizzas with the best SAIN globally have a better ranking than the 10 richest pizzas in proteins but generally worse rankings than the 10 richest pizzas in fibers. However, the SAIN score only reflects the nutrients to favor. It is for this reason that the use of the SAIN indicator is often completed by the LIM indicator which includes nutrients to limit. The LIM score of the 80 pizzas were assessed using Equation 3 and it appears that the SAIN and the LIM indicators tend to be negatively correlated (spearman correlation, $r = -0.453$). This means that pizzas with a high SAIN score tend to also have a low LIM score, which means that they have relatively high levels of components to favor but also low levels of nutrients to limit. This shows that, in the case of pizzas, the SAIN score alone tend to represent the global quality of the pizza, since the pizzas with a high SAIN score also tend to have a low LIM score and vice versa.

The use of the energy FU allows to improve the ranking of the most caloric pizzas. Indeed, the

average ranking of the 10 most energy-rich pizzas goes from about 60/80 with a mass FU to about 45/80 with the energy FU. The same is true for the protein-rich pizzas, which see their ranking improve from an average of nearly 60/80 with a mass FU to less than 45/60 with a protein FU. Similarly, the average ranking of the 10 pizzas richest in fiber goes from almost 30/80 with a mass FU to less than 17/30 with a fiber FU. Finally, the average ranking of the 10 pizzas with the highest SAIN score goes from nearly 38/80 with a mass FU to less than 22 with a SAIN score-based FU. Thus, it can be said that the use of a FU based on a nutrient improves the ranking of the richest pizzas in that nutrient, and this is also true for energy based and SAIN based FUs.

Regarding the portion FU, it improves the ranking of pizzas that packaging recommends to consume in a small portion, compared to other pizzas. Indeed, in average, the ranking of the 10 pizzas with the smallest recommended portion goes from around 35/80 using a mass FU to around 10/80 using the portion FU. In terms of mass, the recommended portions go from 100 to 310g, the biggest portion being individual pizzas. Thus, individual pizzas are globally disadvantaged to the benefit of pizzas to be shared for which the consumer will consume a smaller mass.

3.2. Cheeses

The rankings of the 44 cheeses according to their impacts on climate change assessed with different FUs were studied for both studied ripening scenarios (base and alternative). In the base scenario, cheeses are ripened on-site in a small ripening room while in the alternative scenario, cheese are ripened in an off-site larger and better energy efficient ripening room.

3.2.1. Cheeses: Base scenario

3.2.1.1. Evolution of the 44 cheeses' impacts on climate change ranking according to different FU

Figure 4 presents the evolution of the rankings of the 44 cheeses (base scenario) according to their impacts on climate change assessed with different FUs. This figure has been built following the same process as described for pizzas (Figure 1).

Mass	Energy	Proteins	Calcium	Proteins + calcium	SAIN
1	1	1	15	15	25
2	10	11	25	14	15
3	11	10	22	25	14
4	4	4	31	21	31
5	2	8	37	33	20
6	3	2	38	17	22
7	6	3	21	27	21
8	8	5	28	37	28
9	5	6	29	38	37
10	9	15	41	22	38
11	22	9	20	28	17
12	12	18	33	20	27
13	7	7	27	30	29
14	15	14	36	34	33
15	21	17	30	29	30
16	16	12	39	31	34
17	13	25	34	36	36
18	33	16	14	39	39
19	18	21	40	32	32
20	30	33	32	35	41
21	19	13	42	40	35
22	20	19	43	41	1
23	29	24	35	42	40
24	24	27	17	18	8
25	27	37	44	8	18
26	14	38	18	43	2
27	17	22	8	44	3
28	37	28	11	11	42
29	38	20	19	19	5
30	31	30	1	1	4
31	36	34	23	23	11
32	28	29	10	10	7
33	25	31	9	9	19
34	23	36	2	2	9
35	34	39	3	3	43
36	32	32	5	5	13
37	26	23	4	4	12
38	39	26	16	16	10
39	35	35	7	7	6
40	40	40	13	13	44
41	41	41	12	12	23
42	43	42	24	24	16
43	42	43	26	26	24
44	44	44	6	6	26

Figure 4. Evolution of the rankings of the 44 cheeses (base scenario) according to their impacts on climate change assessed using different FUs. Numbering and colors are defined according to mass FU (low numbers and green color stand for low impacts on climate change, high numbers and red color stand for high impacts on climate change). Then for each FU, cheeses are ranked by their impact on climate change, from lowest (top) to highest (bottom).

The use of the different FUs induce an evolution in the ranking of the 44 cheeses compared to the one established with the mass-based FU. The evolution caused by the use of the energy and protein FUs do not induced a global inversion of the ranking. Indeed, the cheeses which

had the better ranking with the mass FU (in green) globally maintain at the top of the ranking with the energy and protein FUs. The same is true for cheeses with the worst ranking (in red). On the opposite, the use of FUs based on calcium, protein+calcium and SAIN score induce a global inversion of the cheeses ranking. Indeed, the cheeses having the best ranking with the mass FU tend to be among the cheeses with the worst ranking with the calcium, protein+calcium and SAIN FUs. Similarly, the cheeses with the worst ranking with the mass FU tend to be among the cheeses with the best ranking with the calcium, protein+calcium and SAIN FUs. Furthermore, the ranking obtained with the protein+calcium FU follows the same trend as the one obtained with the calcium FU but the ranking of the cheeses 34 to 44 are less good with the FU protein+calcium than with the calcium FU. This is due to the fact that the mass of cheese necessary to reach 1/18 of the recommended daily intake in calcium is higher than that necessary to reach 1/18 of the recommended daily intake in protein for 24 of the 44 cheeses. Hence calcium is the limiting nutrient for these cheeses while protein is the limiting nutrient for other cheeses. This explains why the rankings obtained with the calcium and the combined protein+calcium FUs are less similar than the ranking obtained with the fiber and the combined protein+fiber FUs for the pizzas.

The reference flows related to 1/18 of the daily recommended intakes were investigated. For calcium, the highest reference flow (i.e. the mass of cheese that it is necessary to consume to ingest 1/18 of the daily recommended intakes in calcium) is 13 times higher than the lowest reference flow. Conversely, for protein, the dispersion is more moderate, which explains why there is only a factor of 1.6 between the highest and lowest reference flows. This raises questions about the use of calcium as a basis for comparing environmental impacts of the different cheeses. This is because the differences in product mass to be consumed to achieve these masses are very large, and as such, if one product has less impact than another but 10 times more must be consumed to have the same amount of calcium, is this a relevant comparison? Saarinen et al (2017) already discussed this limit for products from the same group (protein-rich products) but of very different origin (notably animal vs. vegetable). Our results obtained using a UF based on 1/18 of the daily recommended calcium intakes between different cheeses show that products from the same category are not necessarily nutritionally close and that, when the nutritional difference is important, the use of nutritional FU may pose the same limitations as when it is used between products from different categories (and with different nutritional compositions).

3.2.1.2. Influence of the FU used on the dispersion of the 80 pizzas' impacts on climate change

The influence of the choice of FU on the dispersion of the calculated impacts on climate change was also investigated and compared for the two food products. Figure 5 shows the dispersion of impacts on climate change for the 44 cheeses studied with the base scenario.

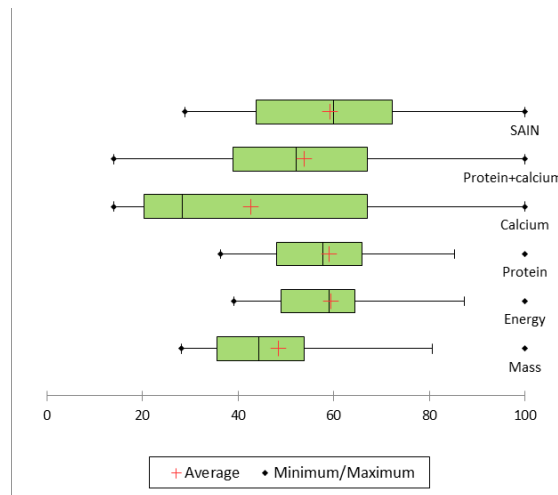


Figure 5. Evolution of the dispersion of impacts on climate change of the 44 cheeses (base scenario) assessed with different FUs

While the differences of impact on climate change distribution were little from one FU to another in the case of pizzas (Figure 2), this is different for the cheese models. Indeed, while the distributions of impacts assessed with the mass, energy and protein FUs are quite similar, the distribution of impacts assessed with the calcium, protein+calcium and SAIN FUs are largely wider. The differences in climate change impacts are greater between cheeses when a calcium, protein+calcium, or SAIN FUs is used than when a mass, energy, or protein FU is used. This observation is true for both base and alternative scenarios.

The fact that the selected FU can have a strong influence on the environmental impacts dispersion among cheeses must be kept in mind while analyzing LCA results because it can lead to different conclusions. For example, the cheese with the highest impacts on climate change (base scenario) has more than 3 times more impacts than the cheese with the lowest impacts when using the mass FU while with the calcium FU, the cheese with highest impact has more than 6.5 times more impact than the cheese with the lowest impact. This also highlights the need for precise and reliable data in order to compare environmental impacts of different products from the same category using LCA. Indeed, LCA inventory data often come with uncertainty that can lead to misleading results if the goal is to compare products.

3.2.1.3. Identification of the cheeses favored by the use of each FU

In order to understand the differences of ranking profiles between the different FU studied, the evolution of the ranking of the richest cheeses in energy, protein, calcium, and having the best SAIN score were studied. Figure 6 shows the evolution of the rankings of the 10 richest cheeses in energy, the 10 richest cheeses in proteins, the 10 richest cheeses in fibers and the 10 cheeses with the best SAIN scores, using different FUs.

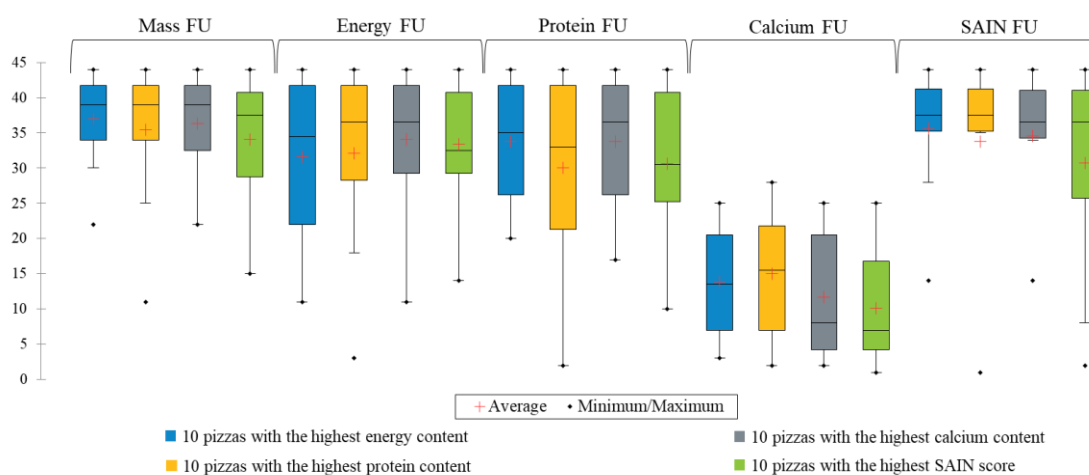


Figure 6. Boxplots representing the dispersion of the rankings of the 10 cheeses with the highest contents in energy, protein, fiber, and with the highest SAIN scores according to their impacts on climate change assessed with different FUs

First of all, it can be said that, with the mass-based FU, the richest cheeses in energy, protein, and calcium as well as the cheeses with the best SAIN score tend to have a bad ranking (more than 32/44 in average), meaning that they tend to have higher impacts on climate change than other cheeses when a mass FU is used (Figure 6). This is logical since the driest cheeses, which are globally those with the most impacts on climate change when assessed using a mass FU, are those that require the most milk to make and therefore the more concentrated in milk nutrient. Furthermore, the calculation of the SAIN score for cheeses takes into account their protein and calcium contents per 100kcal, two nutrients that are most concentrated in dry cheeses. It is therefore logical that the cheeses with the highest impacts on climate change (with a mass FU) tend to have a good SAIN score. As for the pizza, the LIM scores of the 44 cheeses were calculated using Equation 3. It appears that the SAIN and the LIM indicators are positively correlated (spearman correlation, $r = 0.528$). This means that, in contrast to what was observed for pizzas, cheeses with a high SAIN score tend to also have a high LIM score. This means that cheeses that have relatively high levels of nutrients to favor (in this case protein and calcium) also tend to have high levels of nutrients to limit (in this case saturated fatty acids and sodium). This shows that the SAIN score alone doesn't reflect the global nutritional quality of the cheeses and that the LIM indicator should be calculated in addition in order to avoid misleading conclusions. This also shows that improving the ranking of the cheeses with high contents of protein and calcium using a FU based on protein, calcium or SAIN score, also improve the ranking of cheeses with high contents of nutrient to limit. This is a limitation of the use of protein, calcium and SAIN score as a FU in the case of cheeses and shows that the content in nutrients to limit should be kept in mind while interpreting the results.

The average ranking of the richest cheeses in energy is better with an energy FU (32 instead of 37). Similarly, the average ranking of the richest cheeses in protein is better with a protein FU (32 instead of 35). However, these improvements are quite low compared to the one obtained

with the calcium FU. Indeed, the average ranking of the richest cheeses in calcium is largely improved when using a calcium FU and go from 36/44 with the mass FU to less than 12/44. The average ranking of the richest pizzas in energy and proteins are also largely improved when the calcium FU is used. This is due to the fact that the 10 cheeses with the highest calcium contents are globally the same as the 10 cheeses with the highest contents in protein and energy. Precisely, 8 of the 10 cheeses with the highest calcium contents are among the 10 cheeses with the highest energy contents, 8 are among the 10 cheeses with the highest protein contents and 8 are among the 10 cheeses with the best SAIN score.

The higher improvement of the ranking of these cheeses when using the calcium FU than when using the energy or the protein FU can be explained by the fact that the differences of calcium contents among cheeses are higher than the differences in energy and protein contents. Figure 7 represents the variability of calcium, protein and fat contents among the 44 cheeses. In this figure, the cheeses calcium contents are expressed as a percentage of the calcium content of the cheese with the highest calcium content. The same is true for the protein and energy contents.

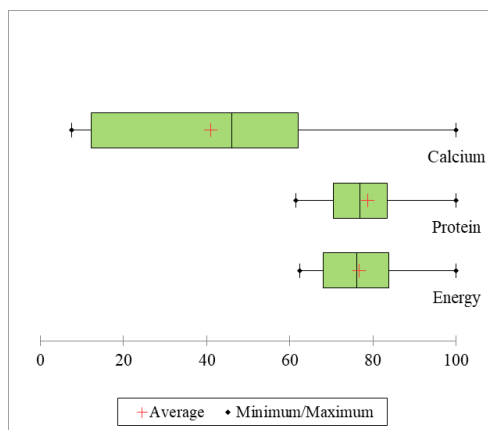


Figure 7. Dispersion of the contents in calcium, protein and energy among the 44 cheeses

As shown in Figure 7, the dispersion of the calcium contents between cheeses is much higher than the dispersion of the protein and energy contents. For example, the cheese with the highest energy content has 1.60 times more energy/100g of cheese than the cheese with the lowest energy content. Similarly, the cheese with the highest protein content has 1.63 times more protein/100g of cheese than the cheese with the lowest energy content. Instead, the cheese with the highest calcium content has 13.3 times more calcium/100g of cheese than the cheese with the lowest calcium content. The observation of figures 4,5,6 and 7 allows us to conclude that the greater the dispersion of a nutrient between the products studied, the more likely it is that the use of a UF based on this nutrient will reverse the ranking. Of course, this would be true only if the richest products in this nutrient are also those with the highest environmental impacts (assessed with a mass-based FU). The wide dispersion of the calcium contents among cheeses is also responsible for the wide variation of reference flows between cheeses using a FU based on 1/18 of the calcium daily recommended intake discussed in

section 3.2.1.1.

3.2.2. Cheeses: Alternative scenario

3.2.2.1. Evolution of the 44 cheeses' impacts on climate change ranking according to different FU

Figure 8 presents the evolution of the ranking of the 44 cheeses (alternative scenario) based on their impacts on climate change assessed using different FUs. This figure has been built following the same process as described for pizzas (Figure 1).

Mass	Energy	Proteins	Calcium	Proteins + calcium	SAIN
1	1	1	38	17	28
2	13	6	17	30	17
3	3	15	28	11	38
4	2	2	39	16	16
5	15	3	27	28	24
6	7	11	40	38	19
7	6	13	37	37	11
8	8	17	42	25	34
9	12	7	34	24	39
10	10	10	43	43	40
11	27	30	44	29	42
12	4	8	24	39	25
13	17	4	30	40	37
14	5	5	25	20	27
15	30	16	32	42	20
16	9	12	19	32	30
17	38	28	29	31	32
18	25	9	35	19	31
19	18	38	31	35	29
20	29	37	20	27	43
21	11	18	41	36	35
22	20	25	36	44	36
23	14	24	16	34	41
24	44	43	11	33	44
25	43	29	33	41	6
26	37	22	6	6	33
27	24	39	10	10	1
28	22	40	15	15	2
29	19	14	26	26	10
30	32	20	21	21	3
31	39	42	1	1	4
32	40	32	2	2	5
33	42	31	12	12	15
34	31	19	13	13	9
35	16	26	3	3	7
36	35	35	4	4	26
37	23	27	18	18	12
38	26	36	5	5	14
39	34	44	7	7	21
40	28	23	14	14	8
41	41	34	9	9	13
42	21	31	22	22	18
43	36	33	23	23	22
44	33	41	8	8	23

Figure 8. Evolution of the rankings of the 44 cheeses (alternative scenario) according to their impacts on climate change assessed using different FUs. Numbering and colors are defined according to mass FU (low number and green color stand for low impacts on climate change, high number and red color stand for high impacts on climate change). Then for each FU, cheeses are ranked by impact on the climate change, from lowest (top) to highest (bottom).

The rankings observed on Figure 8 follow the same trend as those observed on Figure 4 for the base scenario. However, we can see that, contrary to the rankings obtained with the base scenario (Figure 4) for the energy, protein FUs, here (Figure 8) the extremes rankings are more nuanced. This means that the ranking of the pizzas poorly ranked with the mass FU (pizzas 34-44) was more improved by the use of nutritional FUs in the case of the alternative scenario than for the base scenario. Similarly, for the calcium and protein+calcium FUs, pizzas 34 to 44 have a better ranking than that observed for the base scenario. This means that the reversal of the ranking of cheeses using a calcium-based FU is even stronger for the alternative scenario than for the base scenario. This might be explained by the fact that there are more differences in impacts on climate change between the 44 cheeses when the base scenario is used than when the alternative scenario is used. Indeed, with the base scenario, the daily electricity consumption of the ripening rooms is higher than the one used in the alternative scenario. As a result, the differences in impacts on climate change between cheeses ripened a long time and cheeses ripened a short time are higher for the base scenario than for the alternative scenario. It can be said that the less important are the differences of impacts on climate change (mass FU) between products, the more important will be the evolution of the ranking of the products when using nutritional FUs.

3.2.2.2. Influence of the FU used on the dispersion of the 44 cheeses' impacts on climate change

The influence of the choice of FU on the dispersion of the calculated impacts on climate change was investigated. Figure 9 shows the dispersion of impacts on climate change for the 44 cheeses studied with the alternative scenario.

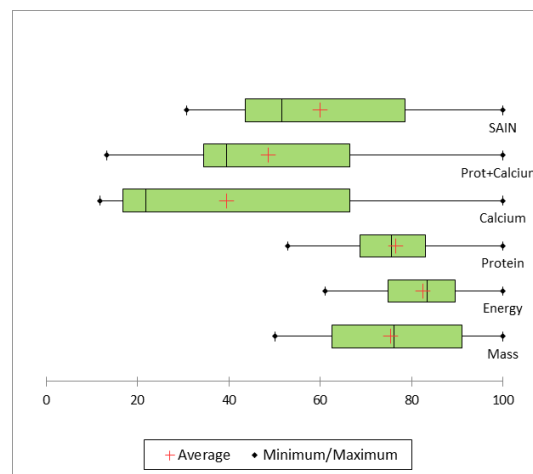


Figure 9. Evolution of the dispersion of impacts on climate changes of the 44 cheeses (alternative scenario) assessed with different FUs

The dispersion of impacts on climate change using different FUs observed on Figure 9 are quite similar as the ones observed on Figure 5 for the base scenario. Although the difference between the highest value and the lowest value using mass, energy and protein FU tend to be higher

for the base scenario (Figure 5) than for the alternative scenario (Figure 9). This might be due to the fact that, using a mass FU, the difference between the cheese with the lowest impacts and the one with the highest impacts is wider for the base scenario than for the alternative scenario.

3.2.2.3. Identification of the cheeses favored by the use of each FU

Similarly, to section 3.2.1.3., the evolution of the 10 richest cheeses in energy, proteins, calcium and with the highest SAIN score based on their impacts on climate change calculated using different FUs were studied. Figure 10 shows the evolution of the ranking of these pizzas.

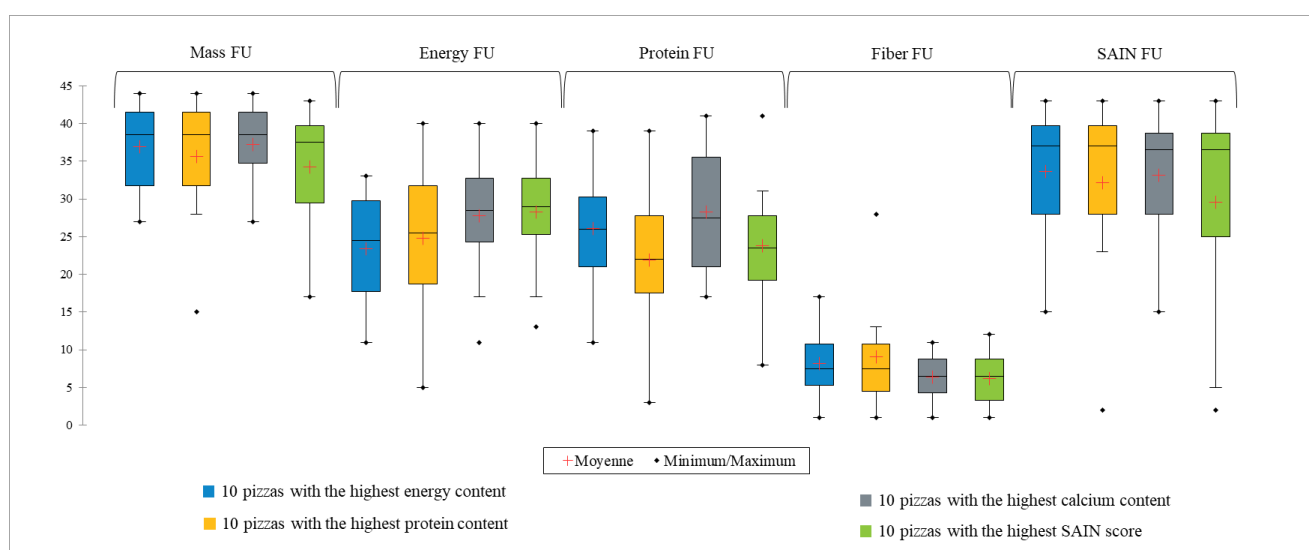


Figure 10. Boxplots representing the dispersion of the rankings of the 10 cheeses with the highest contents in energy, protein, fiber, and with the highest SAIN scores according to their impacts on climate change assessed with different FUs

As expected, the richest cheeses in energy, protein, and calcium and with the best SAIN score have globally a bad ranking (more than 32/44). These results are consistent with the ones obtained for the base scenario (Figure 6). However, it can be said that the improvement of the rankings of the richest cheeses in energy, proteins and calcium when using a FU based on energy, protein or calcium is higher for the alternative scenario than for the base scenario. Indeed, for example with the alternative scenario (Figure 10) the average ranking of the 10 richest cheeses in energy go from 37/44 using a mass FU to 24/44 using an energy-based FU while with the base scenario (Figure 6), the average ranking go from 37 to 32. It can therefore be said that for both the base and the alternative scenarios, the rankings of the richest cheeses in energy, protein and calcium are improved by using nutritional FUs based on energy, protein or calcium. However, the improvement of the rankings is higher for the alternative scenario than for the base scenario. Therefore, the improvement is all the more important as the differences in impacts on climate change (mass FU) between the different cheeses are small.

4. Discussion

4.1. Influence of the use of different FUs in order to rank products from the same food category

The study of the two categories, pizzas and cheeses, led to a common main conclusion that the use of a non-mass FU induces a change in the ranking of the environmental impacts of food products from the same category compared to the ranking obtained with a mass FU. Also, for the two categories, a FU that is built on the intensity of a nutrient leads to favor the environmental profile of products rich in that nutrient, which was expected. This is also the case for the most energy-rich products whose ranking is improved when using an energy-based FU and for the foods with the best SAIN scores that are favored by using the SAIN score as a FU.

For the combined FU based on protein and fibers contents for the pizzas and protein and calcium contents for the cheeses, the results are slightly different for the two food categories. Indeed, for the pizza, the ranking obtained with the combined FU is almost exactly the same as the one obtained with the fiber FU. In the case of cheeses, the trend observed in the ranking obtained using the combined FU is similar to the one obtained using a calcium FU but differences are visible. This can be explained by the fact that, for the pizzas, the fiber content is nearly always limiting while for the cheeses, the calcium and the protein contents are alternatively limiting which lead to a ranking that is not the same as the one obtains with the calcium FU nor the one obtained with the protein FU.

Therefore, the use of nutritional FUs can alter the conclusions made with the mass-based FU if the objective is to compare the environmental impacts of products between them. These results are consistent with the literature. For example, Smetana et al. (2015) who compared the environmental performance of different meat substitutes (based on dairy, lab grown meat, insect, gluten, soy and mycoprotein) and chicken meat using mass, energy and dry matter protein content-based FUs concluded that the results were highly influenced by the FU used. Indeed, while the lab grown meat has the highest global environmental impacts (single score) for all studied FU, the rankings of the other products were modified depending of the FU used. The ranking of the four products with the highest environmental impacts (single score) was as follows. Mass-based FU: (1) lab grown meat, (2) chicken and mycoprotein-based substitute, (3) dairy-based substitute; Energy FU: (1) lab grown meat, (2) mycoprotein-based substitute, (3) soymeal-based substitute and insect-based substitute; Protein-based FU: (1) Lab grown meat, (2) mycoprotein-based substitute, (3) gluten-based substitute and dairy-based substitute.

Furthermore, the fact that a FU based on a nutrient or energy improves the ranking of the products richest in that nutrient or energy is also consistent with the literature. For example, a study conducted by Teixeira et al. (2013) comparing different French patés showed that the use of a protein-based FU improved the ranking of the carbon footprint of the 3 patés with the highest protein content. Thus, with the protein FU, these three patés appeared to have less

impact than the others, which was not the case with a mass FU or an energy FU. Therefore, the results obtained in the present study confirmed on a larger number of products the results obtained by previous studies obtained on fewer products. Nevertheless, our results show that, while the use of a FU based on a nutrient intensity tend to improve the ranking of the richest products in this nutrient, this does not necessarily mean that if product A is richer than product B in this nutrient, product A will necessarily have a better ranking than product B using a UF based on this nutrient. Indeed, this will depend on different factors.

4.2. Comparison of the influence of different FUs on the ranking of pizzas and cheeses

For the pizzas, the rankings evolution using non-mass-based FUs do not lead to a reversal of the initial ranking for extreme pizzas obtained with the mass FU. This is also the case for cheeses, except for the calcium FU, and by extension the protein+calcium FU and the SAIN FU as well. As explained in section 3.2.2, the calcium contents of cheeses vary more strongly from one cheese to another than their energy or protein contents, for example. Thus, the greater the variation in a nutrient among the products studied, the more likely it is that a UF based on that nutrient will have a strong influence on the ranking. In particular, if this nutrient is most concentrated in the products with the highest environmental impacts (assessed with a mass FU), the use of this nutrient as a FU can reverse the ranking as it was the case for the ranking of cheeses when using the calcium FU.

Moreover, the variation of environmental impacts between the different products studied also plays a role in the influence that the use of a non-mass FU may have on the ranking of the products. Indeed, this was shown by comparing the different rankings of the 44 cheeses obtained for the base scenario and the alternative scenario, the impacts on climate change (mass FU) being more variable between cheeses in the case of the base scenario than for the alternative scenario. Thus, the more dispersed the impacts on climate change between the products are, the less influence the change of FU will have.

Thus, in the cases we studied in this article, the use of a nutritional FU can reverse the global ranking of products obtained by calculating their impacts on climate change with a mass-based FU (at the scale of a large sample) if:

- The products with the highest impacts on climate change (mass FU) are the most concentrated in the nutrient considered in the FU (or have the highest scores in the case of nutritional scores);
- The dispersion of nutrients between the different products is sufficiently important;
- The dispersion of impacts on climate change (mass FU) between products is low.

Under these conditions, it appears particularly interesting to investigate several FUs and to study the results obtained with a mass FU along with those obtained with nutritional FUs. However, these observations were made based on the two examples presented in this paper

and should be confirmed by further research. It would also be interesting that further research identifies threshold values related to the dispersion of nutrients or of environmental impacts (mass FU) in order to be able to estimate in advance the influence that a FU based on the intensity of a certain nutrient will have on the ranking of a group of products.

4.3. Relevance of the use of a nutritional FUs to assess the environmental performance of food products

In addition to not correctly representing the function of a food product, the use of mass-based-FU favors the intensive productions, which is questionable in the case of food products. However, the use of non-mass-based FUs also has limitations. For example, as already mentioned in the introduction section, the use of a single nutrient as a FU reduces the function of the product to the contribution of this single nutrient. This is also the case for an energy FU. This limitation has been raised by McLaren et al. (2021). The use of FU combining two nutrients allows to consider only two nutrients but remains however limiting in the case where several interesting nutrients are present in this category of products. Furthermore, as showed in the case of pizza, when one nutrient is limiting over the other, using 2 nutrients as a FU can lead to take into account only the limiting one.

The use of nutritional scores, which at first sight seems to be a good way to take into account several nutrients simultaneously in the FU, also has its limits. The first one is that the use of a nutritional score based only on nutrients to be favored does not fully reflect the nutritional quality of a food product and can therefore be misleading. This is especially true when an increasing amount of nutrient to favor induces increasing amounts of nutrients to limit like it was the case for the cheeses, where the SAIN and LIM tend to be positively correlated. Nevertheless, the use of nutritional scores that include both nutrients to promote and to limit within the FU also seems problematic since the function of a nutrient is not to provide nutrients to limit. Furthermore, Saarinen et al (2017) warns that nutritional scores based on both nutrients to favor and to limit may not be suitable to be used as a FU (for example some of them can lead to negative values). For these reasons, they prefer to use a nutritional score that includes only nutrients to favor and then examine the LIM score separately.

There are also limitations to use the recommended serving size as a UF. Indeed, the calculating method used to identify this recommended portion may vary from one company to another, which can make the comparison of different pizzas tricky. In addition, the recommended portion may be very different from the actual portion consumed by the consumer, which would be a more relevant FU, but also a more difficult UF to implement.

The choice of the most appropriate FU must be made according to the context and objectives of the study (EN ISO 14044, 2006). Thus, the choice of a mass functional unit can be interesting if the context of the study is a questioning on the environmental impact of a quantity of products manufactured/sold. Therefore, it can be adapted to industrial selling products by weight. However, it will have the disadvantage of favoring production systems that allow for

the massification of production, which may be interesting for certain industries but very questionable in the case of the food industry where it may encourage processors to artificially increase the mass of their products. For other stakeholders, other FUs may be of more interest. For example, governments wishing to reduce population deficiencies of a particular nutrient would be well served by using a nutrient-based FU. Thus, the appropriate FU to use will vary among stakeholders as well as among the populations for whom the products are intended.

An option to explore could be the assessment of the environmental performance of food products using a mass FU on the one hand and to combine it with other quality dimensions on the other hand. This could be envisaged by using a multi-criteria tool and would allow to reach a final result translating both the environmental and nutritional quality of the product. This would not limit the nutritional quality to a single nutrient and would allow to take into account different factors. It would also allow the inclusion of other dimensions that can be attributed to the function of a food. Indeed, the function of a food is complex and is not limited to its nutritional contribution. Indeed, food can also provide pleasure (Kringelbach, 2015) and social aspects such as easing social interactions or celebrating (Fieldhouse, 1995). The use of multi-criteria tools also would have the advantage of being able to include several dimensions related to food quality, including qualitative dimensions, which is not necessarily possible within a UF. Therefore, research in this direction could be interesting.

4.4. Other environmental indicators

The results presented in this article focus on the climate change indicator. In order to be able to discuss this choice, the evolution of the environmental impact rankings of the 80 pizzas and 44 cheeses were studied for other environmental indicators (ozone depletion, ionizing radiation, photochemical ozone formation, particulate matter, acidification, freshwater eutrophication, marine eutrophication, terrestrial eutrophication, land use, water use, resource use-fossils, resource use-minerals and metals). It was thus shown that the evolution of the environmental impact rankings of the 80 pizzas according to the different FUs was similar for all the indicators studied, i.e.: general evolution of the pizzas rankings but with extremes that are maintained. On the contrary, for the 44 cheeses (2 scenarios), a difference is observed in relation to the calcium FU. Thus, the inversion of ranking observed with the calcium FU for the climate change indicator is also observed for the land use indicator. It is also partially observed for the electricity sensitive indicators such as ionizing radiation. This is logical since the cheeses with the greatest impacts (mass FU) on these indicators tend to be the cheeses that are ripened the longest, which are globally also the cheeses with the highest calcium contents. Conversely, no inversion is observed when using the calcium FU for the indicators for which goat's milk cheeses have the greatest impacts (mass FU), which is the case of the acidification for example. This is due to the fact that goat's milk cheeses are not necessarily the richest in calcium, which explains why they are not drastically favored by the calcium FU, as it is the case for the climate change indicator. This shows on the one hand the limits of being interested in only one indicator when the goal is to compare different products from the same food category. On the

other hand, it confirms the conclusions drawn earlier, namely that the products with the lowest ranking using a mass FU should also be the richest in the nutrient used as the FU in order to observe a drastic change in the ranking.

5. Conclusion

It appears that the use of nutritional FUs leads to a change in the ranking of the impacts on climate change of cheeses and pizzas. It would thus seem that the use of nutritional FU influences the ranking of the impacts on climate change of food products, even if they belong to the same category and that the use of different FUs can lead to contradictory results. Although these results should be confirmed for other food categories, it seems that it is important not to attribute the same environmental impacts to all the products from a same category. Results show that an LCA result with a nutritional UF allows a good description of the nutritional constraint put in the UF. Indeed, as expected, the use of FU based on a nutrient improves the ranking of the richest products in this nutrient within the whole category. However, the influence of the FU on the products rankings can be different from one FU to another. Thus, the more the use of a nutritional FU will meet the following conditions, the more influence it will have on the ranking of the different products studied compared to the ranking established with a mass FU: the variation of impacts on climate change between the products is rather low when assessed with a mass-based FU, products with the most impacts on climate change are the richest in the nutrient used for the UF and the content of this nutrient has a strong dispersion between the different products studied. In these conditions, the exploration of the results obtained with several different FUs can be interesting in order to compare the impacts on climate change of different food products in a more global way and to be able to make more informed decisions. In general, and in view of the results obtained in this study, there can't be one preferred FU to use within a food product category because the choice of the FU must include the objective of the LCA as well as the concerns and interests of the stakeholders who will use the results obtained. However, we believe that several FUs based, for example, on nutrients of interest for the products studied or for the population to which they are dedicated should be explored in parallel in order to have a better understanding of the environmental impacts of the product and to avoid misleading conclusions. In any case, the FU can never fully represent the function of a food product as it is much more complex than only providing nutrition and multi-criteria approaches including different dimensions related to the function of a food product could be interesting to explore in future research.

References

Berardy, A., Johnston, C.S., Plukis, A., Vizcaino, M., Wharton, C., 2019. Integrating Protein Quality and Quantity with Environmental Impacts in Life Cycle Assessment. *Sustainability* 11, 2747. <https://doi.org/10.3390/su11102747>

- CNIEL, 2022. L'économie laitière en chiffres – Edition 2022. Available online : <https://presse.filiere-laitiere.fr/assets/leconomie-laitiere-en-chiffres-edition-2022-f33b-ef05e.html?lang=fr> (accessed on 22 July 2022)
- Cortesi, A., Pénicaut, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022a. Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market. *Journal of Cleaner Production* 336, 130128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130128>
- Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaut, C., 2022b. Explaining the Differences between the Environmental Impacts of 44 French Artisanal Cheeses. *Sustainability* 14, 9484. <https://doi.org/10.3390/su14159484>
- Cortesi, A., Pénicaut, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022c. Life cycle inventory and assessment data for quantifying the environmental impacts of a wide range of food products belonging to the same food category: A case study of 80 pizzas representatives of the French retail market. *Data in Brief* 41, 107950. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107950>
- Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaut, C., 2022d. Data related to the Life Cycle Assessment of 44 artisanally produced French Protected Designation of Origin (PDO) cheeses. *Data Brief*, 43, 108403. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108403>.
- EN ISO 14044, 2006. Environmental Management. Life Cycle Assessment. Requirements and Guidelines (ISO 14044:2006).
- Fieldhouse, P., 1995. Social functions of food. In: *Food and Nutrition*. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3256-3_4
- Grigoriadis, V., Nugent, A., Brereton, P., 2021. Working towards a combined measure for describing environmental impact and nutritive value of foods: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 112, 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.047>
- Kringelbach, M.L., 2015. The pleasure of food: underlying brain mechanisms of eating and other pleasures. *Flavour* 4, 20. <https://doi.org/10.1186/s13411-014-0029-2>
- Masset, G., Vieux, F., Darmon, N., 2015. Which functional unit to identify sustainable foods? *Public Health Nutr* 18, 2488–2497. <https://doi.org/10.1017/S1368980015000579>
- McAuliffe, G.A., Takahashi, T., Lee, M.R.F., 2020. Applications of nutritional functional units in commodity-level life cycle assessment (LCA) of agri-food systems. *Int J Life Cycle Assess* 25, 208–221. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01679-7>
- McAuliffe, G.A., Takahashi, T., Lee, M.R.F., 2018. Framework for life cycle assessment of livestock production systems to account for the nutritional quality of final products. *Food and Energy Security* 7, e00143. <https://doi.org/10.1002/fes3.143>
- McLaren, S., Berardy, A., Henderson, A., Holden, N., Huppertz, T., Jolliet, O., De Camillis, C., Renouf, M., Rugani, B., Saarinen, M., van der Pols, J., Vázquez-Rowe, I., Antón Vallejo, A., Bianchi, M., Chaudhary, A., Chen, C., Cooreman Algoed, M., Dong, H., Grant, T., Green, A., Hallström, E., Hoang, H., Leip, A., Lynch, J., McAuliffe, G., Ridoutt, B., Saget, S., Scherer, L., Tuomisto, H., Tyedmers, P. & van Zanten, H. 2021. Integration of environment and nutrition in life cycle assessment of food items: opportunities and challenges. Rome, FAO
- Ministère des solidarités et de la santé, 2019. Programme national nutrition santé 2019-2023.
- Moughan, P.J., 2021. Population protein intakes and food sustainability indices: The metrics matter. *Glob. Food Secur.* 29, 100548. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100548>
- Oonincx, D.G.A.B., Boer, I.J.M. de, 2012. Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans – A Life Cycle Assessment. *PLOS ONE* 7, e51145. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051145>
- PIC International, 2020. La croissance retrouvée du marché de la pizza - News commerce 701 [Online]. Available. <https://www.pic-inter.com/actualites-commerce/news-commerce/la>

croissance-retrouvee-du-marche-de-la-pizza-701.html (Accessed 9 February 2021).

Saarinen, M., Fogelholm, M., Tahvonen, R., Kurppa, S., 2017. Taking nutrition into account within the life cycle assessment of food products. *Journal of Cleaner Production* 149, 828–844. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.062>

Sala S., Cerutti A.K., Pant R., 2018. Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. Luxembourg, Publication Office of the European. <https://doi.org/10.2760/945290>

Salazar T, M.B., Cai, H., Bailey, R., Huang, J.-Y., 2019. Defining nutritionally and environmentally healthy dietary choices of omega-3 fatty acids. *J. Clean. Prod.* 228, 1025–1033. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.359>

Smetana, S., Mathys, A., Knoch, A., Heinz, V., 2015. Meat alternatives: life cycle assessment of most known meat substitutes. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 1254–1267. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0931-6>

Sonesson, U., Davis, J., Hallström, E., Woodhouse, A., 2019. Dietary-dependent nutrient quality indexes as a complementary functional unit in LCA: A feasible option? *Journal of Cleaner Production* 211, 620–627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.171>

Teixeira, R., Himeno, A., Gustavus, L., 2013. Carbon footprint of breton pâté production: A case study. *Integrated Environmental Assessment and Management* 9, 645–651. <https://doi.org/10.1002/ieam.1458>

Tharrey, M., Maillot, M., Azais-Braesco, V., Darmon, N., 2017. From the SAIN,LIM system to the SENS algorithm: a review of a French approach of nutrient profiling. *Proceedings of the Nutrition Society* 76, 237–246. <https://doi.org/10.1017/S0029665117000817>

Xu, Z., Xu, W., Peng, Z., Yang, Q., Zhang, Z., 2018. Effects of different functional units on carbon footprint values of different carbohydrate-rich foods in China. *Journal of Cleaner Production* 198, 907–916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.091>

4.3. CONCLUSION DU CHAPITRE 4

L'article 4 a permis de mettre en évidence différents aspects d'intérêt pour la thèse.

Tout d'abord, l'inclusion de la dimension environnementale au sein de l'UF permet effectivement d'obtenir des résultats d'ACV témoignant de la qualité nutritionnelle telle qu'inclue dans l'UF. Par exemple, les produits les plus riches en protéines sont avantagés par rapport aux autres lorsqu'une UF basée sur les protéines est utilisée. Ces observations tendent à valider nos hypothèses selon lesquelles l'inclusion de la dimension nutritionnelle permet, d'une part, d'inclure conjointement les dimensions environnementales et nutritionnelles dans l'évaluation de produits alimentaires et, d'autre part, de mieux prendre en compte la fonction du produit étudié au sein de l'UF. Néanmoins, cette approche présente plusieurs limites. La première est qu'il est difficile de représenter la qualité nutritionnelle globale au sein d'une UF. De plus, l'utilisation de scores nutritionnels n'incluant que des nutriments à favoriser (tels que le SAIN) ne représentent pas entièrement la qualité nutritionnelle globale de certains produits. C'est le cas notamment pour les fromages. En effet, pour cette catégorie de produit, plus un fromage est riche en nutriments à favoriser (bon score SAIN) et plus il a aussi tendance à être riche en nutriments à limiter (mauvais score LIM).

De plus, l'utilisation en parallèle de différentes UF nutritionnelles peut permettre une vision plus globale. Cela peut toutefois être difficile à mettre en œuvre, par exemple dans une démarche de conception ou de reconception puisque les conclusions obtenues à l'aide de ces différentes UF peuvent être différentes voire contradictoires. De plus, les résultats ainsi obtenus ne permettent pas d'identifier facilement les contributions respectives de la dimension environnementale et de la dimension nutritionnelle aux résultats, ce qui rend leurs utilisations difficiles dans une démarche de conception. Enfin, l'inclusion de plusieurs dimensions au sein de l'UF semble difficilement envisageable, et encore plus pour des dimensions plus quantitatives.

Pour toutes ces raisons, il apparaît que l'utilisation d'UF nutritionnelles peut s'avérer pertinente pour témoigner de la fonction d'un produit, notamment dans le cas du développement d'un produit destiné à une population ayant des besoins spécifiques telle qu'une carence en un certain nutriment qui pourrait servir d'UF. Néanmoins, l'intérêt de son utilisation dans le but de coupler qualité nutritionnelle et qualité environnementale dans la conception et la reconception de produits alimentaires plus généraux reste limité.

CHAPITRE 5 : PRISE EN COMPTE ACTUELLE DE LA QUALITE ENVIRONNEMENTALE AU SEIN DES ENTREPRISES AGROALIMENTAIRES

Afin de répondre à la problématique de thèse « comment évaluer la qualité environnementale pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception de produits

alimentaires ? », il est nécessaire de déterminer les dimensions de qualité importantes aux yeux des professionnels de l'agroalimentaire. Notre hypothèse est que les principales dimensions de qualité d'un produit alimentaire aux yeux des professionnels de l'agroalimentaire sont la qualité nutritionnelle et la qualité sensorielle. De plus, afin de pouvoir intégrer la dimension environnementale à ces dimensions en conception de produit, il est nécessaire de déterminer la place de la dimension environnementale par rapport à ces autres dimensions d'intérêt. C'est à ces deux objectifs que se propose de répondre le chapitre 5 (Figure 5.1.).

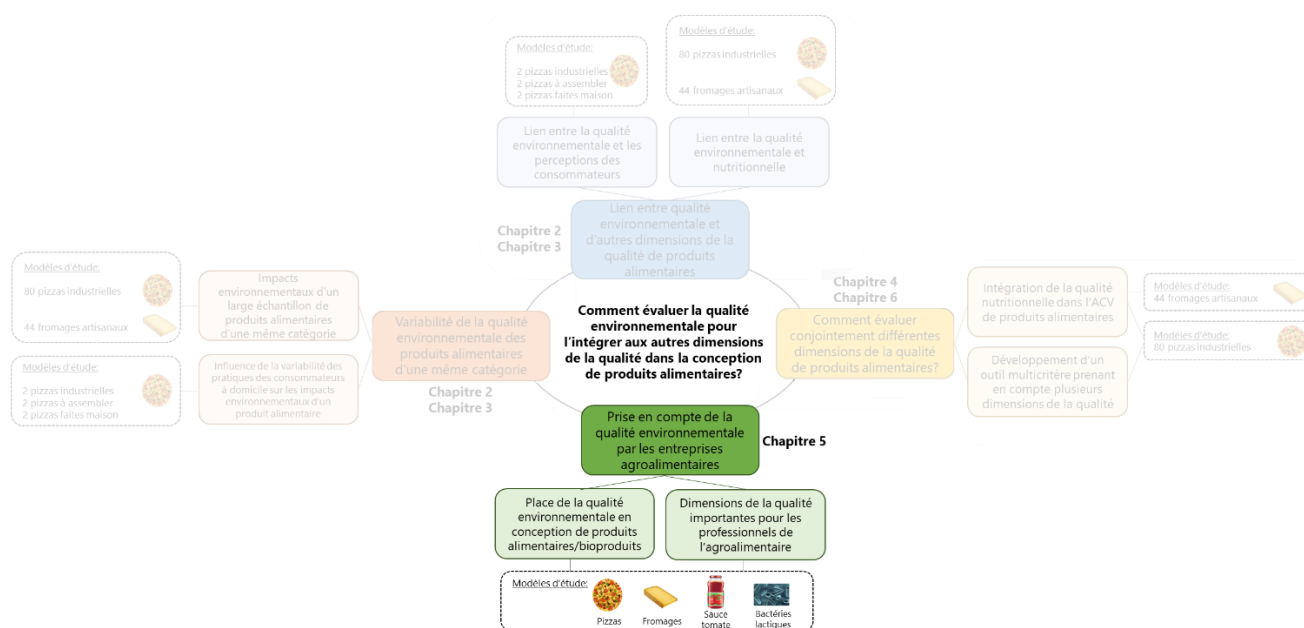


Figure 5.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 5

5.1. INTRODUCTION

La volonté de réduire les impacts environnementaux liés à l'alimentation humaine ne cesse de s'accroître aussi bien du côté d'une partie des consommateurs (Soler et al., 2020) que de celui des pouvoirs publics (France stratégie, 2021). Par exemple, la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire votée en 2020 a pour objectifs principaux de sortir du plastique jetable, de mieux informer les consommateurs et de lutter contre le gaspillage alimentaire (Ministère de la transition écologique, 2022a). De plus, la loi Pacte, adoptée le 11 avril 2018 est à l'origine de la notion de « société à mission » relative aux entreprises répondant à des critères sociaux et environnementaux, permettant ainsi de les valoriser (Ministère de l'économie, des finances et de la relance, 2021). Comme présenté dans le chapitre 1, la prise en compte des impacts environnementaux au sein des entreprises peut se faire selon différentes stratégies. Les entreprises peuvent ainsi mettre en place des actions en réponse à une contrainte réglementaire (stratégie prescriptive). Elles peuvent également mettre en place des actions volontaires. Pour se faire, elles peuvent s'appuyer sur une norme, comme par exemple dans le cadre d'une démarche d'écoconception (norme ISO 14062 (ISO, 2003)).

Parmi les normes à disposition des entreprises, la famille ISO 26000 est dédiée à la responsabilité sociétale des entreprises (RSE) et la norme ISO 26030 est spécifiquement dédiée à la RSE au sein des entreprises agroalimentaires. La mise en place d'une politique RSE sous-tend des actions à différentes échelles comme par exemple des actions de management de site et des actions au niveau de la conception. L'objectif de ce chapitre est d'identifier la place de la qualité environnementale des produits alimentaires par rapport aux autres dimensions de qualité aux yeux de différents professionnels de l'industrie agroalimentaire. En d'autres termes, est-ce que la qualité environnementale d'un produit alimentaire est perçue ou non comme une dimension de la qualité du produit ? Et si oui, l'est-elle au même niveau que les autres dimensions ? L'objectif est également d'identifier les principales dimensions de la qualité d'un produit alimentaire prises en compte par ces professionnels ainsi que les critères et indicateurs associés. Les dimensions, critères et indicateurs ainsi identifiés serviront également au développement de l'outil multicritère d'aide à la conception présenté dans le Chapitre 6. Les termes « dimension », « critère » et « indicateur » seront employés dans ce chapitre avec les définitions qui suivent (Recchia et al., 2011). Le terme « dimension » fait ici référence à un grand domaine d'intérêt pour les personnes interrogées vis-à-vis du produit en question, comme par exemple la dimension environnementale. Le « critère » permet de décrire une dimension et un « indicateur » permet quant à lui de calculer/mesurer un critère.

5.2. MATERIEL ET METHODE

5.2.1. Choix des modèles d'étude

Par cohérence avec le reste des chapitres, cette étude a un focus « produit ». Le choix des modèles d'étude a été fait en respectant les contraintes suivantes :

- Inclure des modèles d'étude utilisés dans les autres chapitres : pizzas et fromages.
- Interroger des entreprises productrices de différents types de produits (bioproduit, produit alimentaire issu de la transformation d'un ingrédient principal et produit alimentaire issu de l'assemblage de plusieurs ingrédients) afin de pouvoir observer si les critères de qualité diffèrent d'un type de produit à l'autre.
- Ne pas inclure uniquement des produits alimentaires à connotation « plaisir » ce qui pourrait avoir une incidence sur les critères de qualité mentionnés par les professionnels interrogés.
- Choisir des produits affiliés afin de pouvoir observer une éventuelle évolution des critères de qualité au cours de la chaîne de valeur. On considère ainsi que deux produits sont affiliés si l'un est utilisé dans la fabrication de l'autre.

Quatre produits ont ainsi été sélectionnés (figure 5.2). Les bactéries lactiques sont des bioproduits pouvant intervenir dans la fabrication des fromages. Les fromages et les sauces tomate sont quant à eux des produits issus de la transformation d'un ingrédient principal et sont également des ingrédients des pizzas. Les fromages et les pizzas ont une connotation de produits « plaisir » que n'a pas la sauce tomate.

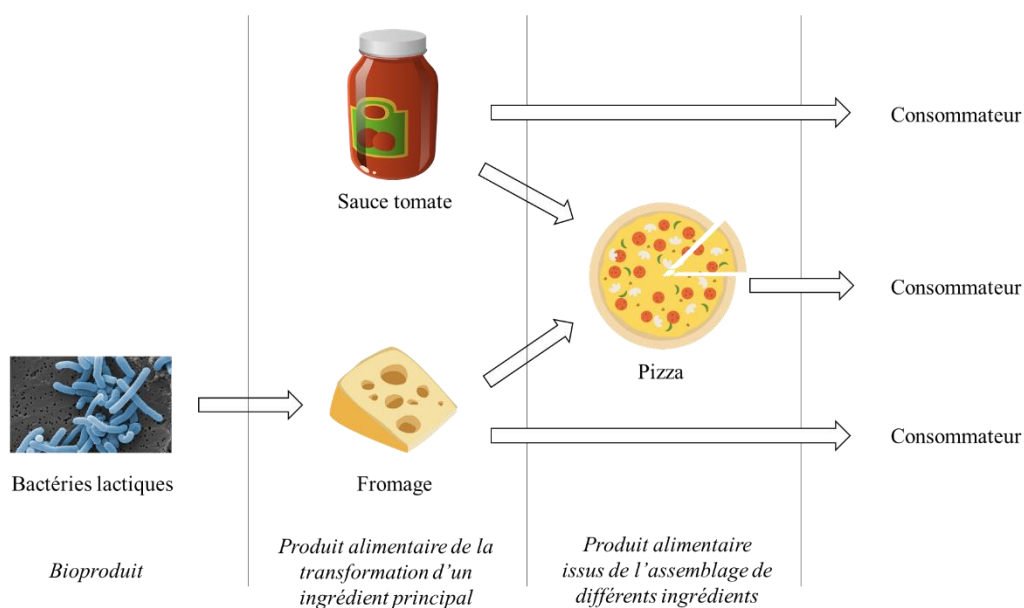


Figure 5.2. Modèles d'étude sélectionnés

5.2.2. Participants

L'étude a suivi une approche qualitative visant à une exploration générale du sujet. Pour ce faire, des entretiens semi-dirigés ont été menés par téléphone auprès de différents professionnels de l'agroalimentaire travaillant au contact d'un des modèles d'étude sélectionnés. Les critères d'inclusion pour le recrutement des participants étaient : travailler actuellement dans une entreprise agroalimentaire et avoir un poste en lien avec l'un des quatre modèles d'étude ou y avoir travaillé il y a moins de 5 ans et pendant une durée supérieure à 6 mois. Le recrutement de ces professionnels s'est fait par différents biais tels que des réseaux sociaux professionnels (exemple : « LinkedIn »), les réseaux professionnels et les réseaux alumni. L'échantillonnage a suivi la méthode dite « boule de neige » qui est une méthode d'échantillonnage en chaîne impliquant d'utiliser les recommandations des premiers participants interrogés afin de trouver d'autres participants.

Les professionnels ayant participé à l'étude sont les suivants : 5 professionnels travaillant sur les fromages, 4 travaillant sur des sauces tomate, 4 travaillant sur des pizzas et 3 travaillant sur des bactéries lactiques. Ces personnes occupaient des postes dans des services variés au sein de différentes entreprises comme le montre le tableau 5.1. Le type d'entreprise indiqué dans le tableau 5.1 a été défini comme suit (Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, 2021) :

- PME : entreprise de moins de 250 employés dont le chiffre d'affaires annuel ne dépasse pas 50 millions et dont le total du bilan ne dépasse pas les 43 millions d'euros.

- ETI : entreprise n'étant pas une PME, de moins de 5000 employés, dont le chiffre d'affaires annuel ne dépasse pas les 1500 millions et dont le bilan n'excède pas 2000 millions d'euros
- Grande entreprise : Toute entreprise n'étant pas une PME ou une ETI.

Tableau 5.1. Type d'entreprise et de service dans lesquels exercent les personnes interrogées

Bactéries lactiques		Fromage		Sauce tomate		Pizza	
Entreprise	Service	Entreprise	Service	Entreprise	Service	Entreprise	Service
Grande entreprise	R&D	ETI	R&D	PME	R&D	Grande entreprise	R&D
Grande entreprise	R&D	Grande entreprise	Marketing	PME	R&D	ETI	R&D
ETI	Production	ETI	Production	PME	Qualité puis R&D	PME	R&D
		ETI	Production	PME	Direction	ETI	Qualité
		PME	Qualité				

Concernant les entreprises du secteur de la sauce tomate, deux entreprises font de la première transformation de tomates, c'est-à-dire de la transformation de tomates fraîches en produits constitués uniquement de tomates (ex : purée, concentré, concassé). L'une de ces deux entreprises travaille en BtoB uniquement tandis que l'autre travaille à la fois en BtoB et en BtoC, ce qui signifie qu'elle vend une partie de ses produits à des entreprises (ex : fabricants de pizzas) et l'autre partie directement à des consommateurs. Les deux autres entreprises font de la seconde transformation, c'est-à-dire qu'elles transforment la tomate une seconde fois (par exemple pour faire de la sauce tomate cuisinée à partir de pulpe de tomates). Dans ce manuscrit nous qualifierons de « sauce tomate » aussi bien des produits issus de la première transformation de tomates (ex : purée de tomates) que des sauces cuisinées issues d'une seconde transformation.

Afin de voir si les indicateurs de qualité environnementale sont différents et/ou plus nombreux pour des entreprises agroalimentaires revendiquant un positionnement durable, trois professionnels travaillant au sein de ce type d'entreprise ont également été interrogés. Ces personnes ne travaillent pas spécifiquement dans le secteur des quatre modèles d'étude mais permettront d'apporter un regard complémentaire. Ici, nous avons considéré qu'une entreprise revendiquait un positionnement durable lorsque l'un de ces termes était présent directement sur l'emballage du produit ou en première page du site internet (au jour de l'entretien) : « durable », « durabilité », « environnement », « environnementale ». Une personne travaillant dans la direction d'une PME, une personne travaillant dans le service Qualité d'une grande entreprise et une personne travaillant à la direction d'une ETI ont été interrogées.

5.2.3. Déroulement des entretiens

L'interrogation des participants s'est faite à l'aide d'entretiens semi-directifs et ont été menés par téléphone entre avril 2020 et juin 2022. L'accord préalable des participants a été demandé afin de pouvoir enregistrer les conversations. En cas de refus, la conversation n'a pas été enregistrée et seules des notes manuscrites ont été prises au cours de l'entretien. Les entretiens enregistrés ont quant à eux été retranscrits manuellement à la suite. La durée moyenne des entretiens est d'une trentaine de minutes.

5.2.4. Grille d'entretien

Le grille d'entretien a été construite dans le but de récolter les informations suivantes :

- Identifier des dimensions de la qualité des produits alimentaires ainsi que des critères de qualité et indicateurs associés pris en compte par les professionnels interrogés.
- Identifier si ces dimensions/critères/indicateurs sont mentionnés spontanément en réponse à la question (2) (cf. ci-dessous) ou si d'autres questions ont été nécessaires.
- Identifier si la dimension environnementale est étudiée au sein de l'entreprise.
- Si la dimension environnementale est étudiée, identifier les critères/indicateurs utilisés afin de l'évaluer et/ou de l'améliorer.

Ainsi, l'objectif n'est pas de capter l'entièreté des critères employés par les personnes interrogées mais de définir avec eux le premier cercle de critères définissant les caractéristiques majeures du produit à obtenir et observer si la dimension environnementale en fait partie ou non. Afin de récolter ces informations, les questions suivantes ont été abordées :

- (1) Pouvez-vous m'indiquer le poste que vous occupez ainsi que le ou les produits sur lesquels vous travaillez.
- (2) Quels sont pour vous les principaux critères de qualité à prendre en compte pour [modèle d'étude] ?
- (3) Pouvez-vous hiérarchiser les critères mentionnés précédemment ? Lesquels vous apparaissent comme étant les plus importants et pourquoi ?
- (4) Quels indicateurs utilisez-vous pour mesurer ces critères de qualité ?
- (5) Votre entreprise s'intéresse-t-elle à des critères de qualité en lien avec l'environnement ? (Question posée uniquement si l'environnement n'a pas été cité dans la réponse à la question 2)
- (6) Pensez-vous qu'il serait intéressant pour votre entreprise de considérer d'autres critères de qualité de produits que ceux étudiés à l'heure actuelle ?
- (7) Avez-vous des remarques, questions, suggestions au terme de cet entretien ?

5.2.5. Traitement des résultats

Les enregistrements des entretiens ont été retranscrits manuellement. Les différentes

transcriptions ainsi que les notes manuscrites (dans le cas où le participant ne souhaitait pas être enregistré) ont ensuite été étudiées afin d'identifier les différentes dimensions de qualités ainsi que les critères et indicateurs qui en ressortaient. Une attention particulière a été portée à définir si le critère/indicateur a été énoncé spontanément par la personne interrogée suite à la question (2) ou si d'autres questions au cours de la discussion ont été nécessaires pour le faire émerger. Des critères et indicateurs ont été introduits par les personnes interrogées sans forcément mentionner à quelle dimension ils pouvaient se rattacher. Dans le cas où l'affiliation était clairement établie par un autre participant, cette même affiliation était utilisée. Sinon, une affiliation basée sur notre expertise personnelle a été utilisée. Par exemple, si le participant N explicite que la « teneur en protéines » fait pour lui référence à la dimension nutritionnelle, alors la teneur en protéines mentionnée par le participant N+1 sera également attribuée à cette dimension, même si le participant N+1 n'a pas explicité ce lien. En cas d'hésitation quant à l'affiliation à utiliser, aucune affiliation n'a été établie et les critères/indicateurs recueillis ont été traités séparément. Ces critères/indicateurs seront présentés dans les paragraphes intitulés « Qualité autre » dans le reste du texte. De plus, les critères et indicateurs ont la plupart du temps été mentionnés sans hiérarchisation et seront donc présentés ainsi.

5.3. RESULTATS

5.3.1. Principaux critères de qualité

Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux réponses données spontanément à la question (2) « Quels sont pour vous les principaux critères de qualité à prendre en compte pour [modèle d'étude] ? ». Le nombre de mention par rapport au nombre total de personnes interrogées en lien avec le modèle d'étude dont il est question sera présenté sous la forme « X1/X2 » avec X1 le nombre de mention et X2 le nombre de personnes interrogées pour ce modèle d'étude. Les termes tels que mentionnés par les personnes interrogées seront en italique.

5.3.1.1. Modèle d'étude bactéries lactiques

Trois professionnels du secteur des bactéries lactiques ont été interrogés. De même que pour les autres modèles d'étude, les critères et indicateurs énoncés spontanément ont été classés dans cinq dimensions.

5.3.1.1.1. Qualité sanitaire/sécurité

Des indicateurs d'ordre sanitaire ont été mentionnés par une des personnes interrogées tels que *l'absence de levures, moisissures* ou *coliforme* et *l'absence de contamination croisée*. Le fait que les bactéries soient *non OGM* et aient le *statut GRAS* (Generally Recognized As Safe) a également été mentionné à une reprise.

5.3.1.1.2. Qualité nutritionnelle/santé

Une personne a mentionné les propriétés probiotiques des bactéries et une autre a cité la capacité des bactéries à former des molécules présentant un intérêt nutritionnel. La capacité des bactéries à survivre après consommation et donc à avoir une action réelle a également été mentionnée par une des personnes interrogées.

5.3.1.1.3. Qualité sensorielle

Bien que la qualité sensorielle des bactéries en elles-mêmes n'ait pas été introduite directement, comme nous pouvions nous y attendre, leur capacité texturante a été citée (1/3). De même, leur capacité à former des *molécules aromatiques* a été mentionnée comme indicateur de qualité (2/3).

5.3.1.1.4. Qualité fonctionnelle

Les trois professionnels interrogés ont indiqué des critères relatifs à la qualité fonctionnelle des bactéries lactiques : *vitesse d'acidification* (2/3), *durée de la phase de latence* (1/3), *quantité d'UFC/g de ferment* (c'est-à-dire la quantité de bactéries viables /g de ferment) (1/3), *capacité acidifiante* (1/3), *pureté microbiologique* (1/3).

5.3.1.1.5. Synthèse

Comme nous pouvions nous y attendre pour ce modèle d'étude, c'est la qualité fonctionnelle qui a principalement été mise en avant par les personnes interrogées. Néanmoins, la capacité des bactéries lactiques à conférer des propriétés sensorielles et nutritionnelles particulières aux produits dans lesquels elles seront utilisées ont également été citées. La dimension environnementale n'a été abordée spontanément par aucune des personnes interrogées, ce qui montre qu'elle n'est pas prioritaire ou qu'elle n'est pas perçue comme une dimension de la qualité des bactéries lactiques.

5.3.1.2. Modèle d'étude fromage

Les professionnels du secteur des fromages interrogés ont spontanément mentionné des critères ou indicateurs pouvant être regroupés dans les dimensions suivantes : sensorielle (4/5), nutritionnelle/santé (3/5), sanitaire/sécurité (3/5), fonctionnelle (2/5). Les critères/indicateurs n'ayant pas pu être affiliés à l'une de ces dimensions ont été regroupés dans une catégorie « autre » qui sera présentée dans un paragraphe dédié.

5.3.1.2.1. Qualité sensorielle

Quatre des cinq personnes interrogées ont indiqué des critères/indicateurs en lien avec la qualité sensorielle des fromages. Le tableau 5.2 répertorie les critères/indicateurs en lien avec la qualité sensorielle énoncés spontanément par les répondants ainsi que le nombre de fois qu'ils ont été dits. Afin d'en faciliter la lecture, ces termes ont été séparés en trois sous-critères : visuel, goût et texture. L'odeur a également été mentionnée par une des personnes interrogées.

Tableau 5.2. Critères/Indicateurs sensoriels mentionnés spontanément par les professionnels du secteur des fromages et nombre de mentions

Visuel	Mentions	Goût	Mentions	Texture	Mentions
Visuel global (extérieur et intérieur)	2	Salé	1	Pâteux	1
Homogénéité (de la répartition des ouvertures)	2	Sucré	1	Collant	1
Absence de trou	2	Saveur	1	Fondant	1
Visuel extérieur	1	Piquant	1	Fermeté	1
Visuel à la coupe	1	Fruit jaune	1	Filant	1
Taille des ouvertures	1	Fruit rouge	1	Etalement à la cuisson	1
Moisissure	1	Fuité	1	Exsudation de matière grasse	1
Couleur	1	Goût global	1		
Propreté de la croûte	1	Grillé	1		
Absence de déchirure	1	Intensité	1		
Absence de cisaillement	1	Acide	1		
Absence de grain de caillé visible	1	Amer	1		
Absence de fissure	1	Notes noisette	1		
		Notes végétales	1		

Le fait que 4 des 5 professionnels interrogés aient introduit des indicateurs sensoriels laisse penser que la qualité sensorielle des fromages est particulièrement importante pour les entreprises du secteur. Néanmoins, les indicateurs sont variés (la plupart n'ayant été mentionnés qu'une seule fois), ce qui peut notamment s'expliquer par la variété de types et d'usages des fromages fabriqués par les différents interviewés. Par exemple, une attention particulière est apportée aux propriétés du fromage à la cuisson pour des fromages à destination de l'industrie (ex : industries de pizzas), alors que ce critère est absent du cahier des charges de fromages consommés crus.

5.3.1.2.2. Qualité sanitaire/sécurité

Trois des cinq personnes interrogées ont indiqué des critères/indicateurs en lien avec la qualité sanitaire et la sécurité de consommation du produit. Ces derniers sont: *E. Coli* (1/5), *salmonelle* (1/5), *listeria* (1/5), *risques/dangers physiques* (1/5), *risques/dangers chimiques* (1/5), *allergènes* (2/5), *respect des normes sanitaires pour le lait* (1/5), *respect des normes sanitaires pour le produit final* (1/5).

5.3.1.2.3. Qualité Nutrition/Santé

Des critères/indicateurs en lien avec la dimension nutrition/santé ont été énoncés spontanément par 3 des 5 personnes interrogées : *teneur en sel*, *teneur en calcium*, *teneur en protéines*, *teneur en matières grasses*, *composition de la matière grasse*, *qualité nutritionnelle du lait*, *additifs*. Chacun de ces critères/indicateurs n'a été énoncé qu'une fois. Néanmoins, les deux professionnels n'ayant pas énoncé spontanément de critères ou d'indicateurs en lien avec la qualité nutritionnelle des produits ont introduit quelques indicateurs nutritionnels au cours de

la discussion. Au total, la *teneur en sel* a été l'indicateur le plus recueilli (3/5) suivi par la *teneur en matières grasses* (2/5).

5.3.1.2.4. Qualité fonctionnelle

On qualifie ici de « fonctionnel » les attributs des fromages nécessaires au bon déroulement du processus de production. Le *poids des fromages* ainsi que la *constance dans les produits fabriqués* ont été recueillis une fois chacun comme indicateurs fonctionnels.

5.3.1.2.5. Qualité « Autre »

Les autres critères/indicateurs cités sont l'*absence d'OGM*, la *provenance du lait*, le *type et la durée d'affinage* ainsi que le *label rouge*. Chacun d'entre eux a été mentionné à une reprise.

5.3.1.2.6. Qualité environnementale

Une des personnes interrogées a cité des critères/indicateurs en lien avec la dimension environnementale : la *gestion de l'eau*, la *gestion de l'énergie*, l'*utilisation d'emballages recyclables* et la *réduction des emballages*. Cette personne a également exprimé la volonté de son entreprise de réaliser un bilan carbone dans le futur.

5.3.1.2.7. Synthèse

Les critères/indicateurs les plus mentionnés sont globalement en lien avec la qualité sensorielle des fromages, ce qui semble montrer que cette dimension est particulièrement importante pour ce modèle d'étude. Ceci était prévisible puisque les fromages sont considérés comme des produits « plaisir ». Des indicateurs en lien avec la qualité sanitaire et nutritionnelle ont également été introduits par plusieurs des personnes interrogées.

5.3.1.3. Modèle d'étude sauce tomate

Quatre professionnels du secteur des sauces tomate (première et deuxième transformation) ont été interrogés. De même que pour le modèle d'étude fromage, les critères et indicateurs énoncés ont été regroupés sous différentes dimensions.

5.3.1.3.1. Qualité fonctionnelle

Des critères/indicateurs en lien avec la dimension fonctionnelle du produit ont été cités par l'ensemble des personnes interrogées. Ce sont ceux qui sont revenus le plus fréquemment. La figure 5.3 les présente sous forme de nuage de mots.



Figure 5.3. Nuage de mots représentant les indicateurs de la qualité fonctionnelle des sauces tomate

La figure 5.3 montre que le *degré Brix* (correspondant à la fraction de saccharose dans un liquide, c'est-à-dire le pourcentage de matière sèche soluble) et le *pH* sont les indicateurs fonctionnels les plus fréquemment recueillis. Viennent ensuite le *calibre des pulpes de tomates*, la *viscosité*, le *bostwick* et le fait que la sauce soit traitée en *cold break* ou *hot break*. A noter que plusieurs de ces termes sont liés entre eux. Par exemple, l'utilisation d'un procédé hot break ou cold break influence la viscosité de la sauce. De même, le bostwick consiste à étudier la consistance de la sauce tomate grâce à un système de pont incliné.

5.3.1.3.2. Qualité sensorielle

Chacune des 4 personnes interrogées a mentionné la *couleur*. Le *goût*, l'*absence de résidu de peau/pépin* ainsi que l'*absence de défaut visuel* ont également été mentionnés à raison d'une fois chacun. On peut dire qu'à part la couleur, la qualité sensorielle des sauces tomate semble être moins étudiée que celles des fromages par exemple.

5.3.1.3.3. Qualité sanitaire/sécurité

L'absence de corps étranger a été énoncée à une reprise.

5.3.1.3.4. Synthèse

Pour le modèle d'étude sauce tomate, les termes les plus fréquemment cités sont en lien avec la dimension fonctionnelle du produit. La couleur est également un aspect important mentionné par l'ensemble des personnes interrogées. Contrairement au modèle d'étude fromage, aucun critère/indicateur en lien avec la dimension sanitaire/sécurité, nutrition/santé et environnementale n'a été introduit. De plus, les professionnels interrogés ont dû hiérarchiser les différents critères et indicateurs discutés au cours de l'entretien. Trois des quatre professionnels ont déclaré que le degré Brix était l'indicateur le plus important à leurs yeux. La justification apportée est que si le degré Brix n'est pas bon, la sauce tomate sera plus difficilement processable par la suite. Le degré Brix a également un aspect réglementaire puisque la dénomination d'un produit est conditionnée par son degré Brix qui doit être compris dans une norme précise. Bien que la couleur de la sauce ait été présentée spontanément comme critère de qualité par l'ensemble des professionnels interrogés, aucun critère/indicateur relatif à la qualité nutritionnelle du produit ne l'a été. Ceci peut sembler

étonnant puisque trois des quatre professionnels interrogés occupent un poste au sein d'une entreprise BtoC, ce qui signifie que leurs produits sont directement vendus aux consommateurs finaux. Une hypothèse explicative pourrait être que les sauces tomate ne sont pas connues pour avoir une mauvaise qualité nutritionnelle, ce qui pourrait expliquer pourquoi cette dimension ne fait pas l'objet de plus d'intérêt. Également, le fait que les sauces tomate ne sont pas consommées seules pourrait expliquer pourquoi la dimension sensorielle ne ressort pas davantage. Pas de différences notables n'ont été constatées entre les critères/indicateurs mentionnés par un employé d'entreprise BtoB et un employé d'entreprise BtoC, bien que ce constat doive être confirmé sur un plus large échantillon de chaque type d'entreprise. La dimension environnementale n'a quant à elle été spontanément abordée par aucune des personnes interrogées.

5.3.1.4. Modèle d'étude pizzas

Quatre professionnels du secteur des pizzas ont été interrogés. De même que pour les autres modèles d'étude, les critères et indicateurs recueillis ont été regroupés selon différentes dimensions.

5.3.1.4.1. Qualité sensorielle

Des critères et indicateurs en lien avec la qualité sensorielle des pizzas ont été introduits spontanément par l'ensemble des professionnels interrogés (4/4). Le tableau 5.3 regroupe les critères/indicateurs ainsi recueillis. Afin d'en faciliter la lecture, ils ont été séparés en trois sous-critères : visuel, goût et texture. L'odeur a également été mentionnée (1/4).

Tableau 5.3. Présentation des indicateurs de qualité sensoriels mentionnés spontanément par les professionnels du secteur « pizzas »

Visuel		Goût		Texture	
<i>Pâte colorée</i>	1	<i>Goût global</i>	2	<i>Croustillant</i>	1
<i>Toppings couvrants</i>	1	<i>Goût relevé de la sauce tomate</i>	1	<i>Fromage fondant</i>	1
<i>Toppings bien centrés</i>	1	<i>Sauce tomate gouteuse</i>	1	<i>Fromage filant</i>	1
<i>Pizza bien ronde</i>	1	<i>Sauce tomate sans gout acide</i>	1	<i>Moelleux</i>	1
<i>Hauteur de la pâte</i>	1				
<i>Visuel avant cuisson</i>	1				
<i>Visuel après cuisson</i>	1				
<i>Non débordement de la sauce</i>	1				

Le fait que la dimension sensorielle des pizzas ait été abordée par l'ensemble des professionnels du secteur interrogés montre qu'il s'agit d'une dimension particulièrement importante, plus importante que les autres dimensions qui ont moins été abordées. Cette observation semble logique puisque les pizzas sont des produits dits « plaisir ». Néanmoins, de même que pour les fromages, les termes mentionnés pour décrire la qualité sensorielle

d'une pizza varient d'un professionnel à l'autre. Seul le goût global a été mentionné à deux reprises mais les termes plus précis n'ont quant à eux été mis en avant qu'à une reprise. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'une grande variété de pizzas sont actuellement disponibles sur le marché et que chacune présente des spécificités différentes. On peut toutefois dire que l'aspect visuel, le goût de la sauce tomate ainsi que la texture du fromage à la cuisson semblent être des paramètres importants.

5.3.1.4.2. Qualité fonctionnelle

Des indicateurs faisant référence à la qualité fonctionnelle du produit ont été énoncés par l'ensemble des personnes interrogées. Chacun de ces indicateurs a été mentionné à une reprise : *processabilité des ingrédients*, *dimension de la pizza*, *poids de la pizza*, *collant de la pâte* (pour qu'elle n'accroche pas aux équipements), *capacité de la pâte à être congelée et décongelée sans être altérée*. Chacun de ces indicateurs a été cité une fois.

5.3.1.4.3. Qualité nutritionnelle

Des critères/indicateurs en lien avec la qualité nutritionnelle/santé ont été présentés par deux des quatre professionnels interrogés. Parmi eux : *teneur en acides gras saturés*, *clean label*, *teneur en fibres*, *teneur en glucides*, *énergie (kcal)*, *teneur en lipides*, *NutriScore*, *teneur en sel*, *teneur en sucres*, *additifs*, *absence de gluten*. Chacun n'a été cité qu'à une reprise à l'exception des additifs qui l'ont été à deux reprises. Au cours des discussions, l'un des professionnels travaillant dans une entreprise ne produisant pas que des pizzas a indiqué que la pizza était l'un des produits ayant le moins de critères nutritionnels à respecter. Un autre des professionnels a également mentionné que la pizza était un *produit plaisir* et que le non-respect de l'ensemble des contraintes nutritionnelles initialement établies n'était pas un frein à la mise sur le marché d'une pizza nouvellement développée à condition que cette dernière plaise au consommateur. Il apparaît donc que, bien que des indicateurs nutritionnels existent, ces derniers sont considérés comme moins importants que les indicateurs sensoriels pour la pizza qui est perçue comme un « produit plaisir ». De ce fait, la dimension nutritionnelle semble être toujours conditionnée par la dimension sensorielle dans le cas des pizzas.

5.3.1.4.4. Qualité économique

Deux participants ont mentionné le *prix de la pizza* à ne pas dépasser et une a cité la notion de *coût de production*. Il est à noter que la dimension économique n'a été abordée que pour le modèle d'étude pizzas.

5.3.1.4.5. Qualité « Autre »

L'origine des ingrédients a été mentionnée spontanément à deux reprises. Une des personnes interrogées a mentionné l'origine biologique (label AB) des ingrédients tandis qu'une autre a mentionné l'origine géographique (en l'occurrence française). Nous verrons dans la section 5.3.2. que certains des participants ont mentionné ces indicateurs comme des indicateurs de qualité environnementale suite à la question 5. Cependant, cette filiation n'a pas été faite par les participants ayant spontanément mentionné ces indicateurs à la suite de la question 2. Il

est donc important de souligner que ces indicateurs sont perçus comme des indicateurs de qualité environnementale par certains des participants mais pas par d'autres, ce qui implique que ces indicateurs peuvent être d'intérêt indépendamment de la dimension environnementale.

La capacité de la pizza à s'ancrer dans la *tendance du moment* (comme par exemple développer une pizza aux fromages savoyard en hiver) a été introduit à deux reprises.

5.3.1.4.6. Synthèse

Les critères/indicateurs recueillis le plus fréquemment sont globalement en lien avec la dimension sensorielle des pizzas, ce qui semble montrer que cette dimension est particulièrement importante pour ce modèle d'étude. On remarque que des indicateurs relatifs aux ingrédients ont été cités. Certains d'entre eux avaient également été cités par les professionnels des secteurs fromage et sauce tomate. Par exemple, on retrouve l'indicateur « filant du fromage » aussi bien pour le modèle d'étude pizza que fromage. Également, l'indicateur selon lequel la sauce tomate ne doit pas dépasser de la pâte peut être assimilé aux propriétés fonctionnelles de viscosité de la sauce tomate : une sauce tomate n'ayant pas une viscosité suffisante aura tendance à déborder de la pâte. La dimension environnementale n'a pas été abordée en tant que telle.

5.3.1.5. Différence entre les modèles d'étude

Les critères et indicateurs de qualité recueillis pour chacun des modèles d'études ont été comparés. Pour les modèles d'étude pizzas et fromages, nous avons pu constater que la dimension sensorielle était la plus importante pour les personnes interrogées tandis que pour les bactéries lactiques et les sauces tomate, la dimension fonctionnelle semblait être la plus importante. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les pizzas et les fromages sont des produits « plaisirs » contrairement aux bactéries lactiques et à la sauce tomate. De plus, ces dernières ne sont le plus souvent pas consommées seules (par exemple la sauce tomate peut être utilisée sur une pizza ou sur des pâtes et les bactéries lactiques peuvent être utilisées dans un produit laitier). Ceci pourrait également expliquer pourquoi les dimensions sensorielles et nutritionnelles ne sont pas plus abordées pour ces deux modèles d'étude.

Également, on peut remarquer une certaine filiation entre certains indicateurs. Par exemple, l'aspect filant du fromage est un indicateur de qualité introduit à la fois par les professionnels du secteur des fromages et des pizzas. Cependant, ceci n'est pas toujours le cas. Par exemple, la couleur de la sauce tomate a été évoquée par l'ensemble des professionnels du secteur des sauces tomate interrogés mais n'a pas été mentionnée par les professionnels du secteur des pizzas. Cette filiation était attendue pour les fromages et les sauces tomate utilisées comme ingrédients dans l'industrie des pizzas puisqu'il est important pour les fabricants de satisfaire les attentes de leurs clients.

Nous pouvons également relever que la dimension sanitaire/sécurité n'a pas été

systematiquement abordée par l'ensemble des personnes interrogées mais il est toutefois légitime de penser que cette dimension est incluse par toutes les entreprises. Il est ainsi possible que certaines personnes ne mentionnent pas cette dimension qui est pour elle un prérequis obligatoire plutôt qu'un critère de qualité pouvant être plus ou moins bien respecté. Également, le service au sein duquel exerce la personne interrogée peut jouer un rôle puisque les critères/indicateurs relevant de la dimension sanitaire/sécurité ont plus été mentionnés par des personnes travaillant dans les services qualité et production que par les personnes travaillant dans les services R&D. Ceci semble logique puisque ces services sont plus confrontés à la dimension sanitaire des produits.

La dimension environnementale a été très peu abordée spontanément suite à la question (2). Néanmoins, ceci peut être lié au fait que les personnes interrogées ne perçoivent pas la dimension environnementale comme une dimension de la qualité des produits alimentaires, mais elles peuvent tout de même mener des actions bénéfiques pour l'environnement. Pour cette raison, une question spécifique à la prise en compte de la dimension environnementale leur a été posée afin de recueillir les critères et indicateurs associés (question 5).

5.3.2. La place de l'environnement

Afin d'identifier de potentiels critères/indicateurs de qualité environnementale pris en compte par les entreprises interrogées mais pas forcément considérés comme critères de qualité de produit, une question spécifique leur a été posée (« Votre entreprise s'intéresse-t-elle à des critères de qualité en lien avec l'environnement ? », Question 5). Même après avoir posé cette question, plusieurs personnes interrogées ont eu du mal à répondre mais, au final, chacune a réussi à mentionner au moins une action réalisée (ou en discussion) au sein de l'entreprise en lien avec l'environnement. On peut donc dire que la dimension environnementale ne fait pas partie des critères de qualité d'un produit alimentaire aux yeux des participants mais que leurs entreprises mènent tout de même une ou des actions dans ce domaine.

Le nuage de mots de la figure 5.4 présente les indicateurs/critères obtenus suite à la question 5 et aux discussions en découlant pour tous les modèles d'étude confondus. Différentes couleurs ont été utilisées : Le rouge correspond aux emballages, le bleu aux et produits non conformes, le vert à l'origine de ingrédients, le violet aux consommations et émissions à l'échelle du site de production et le marron aux aménagements du site permettant une réduction de ses impacts environnementaux selon la personne interrogée.

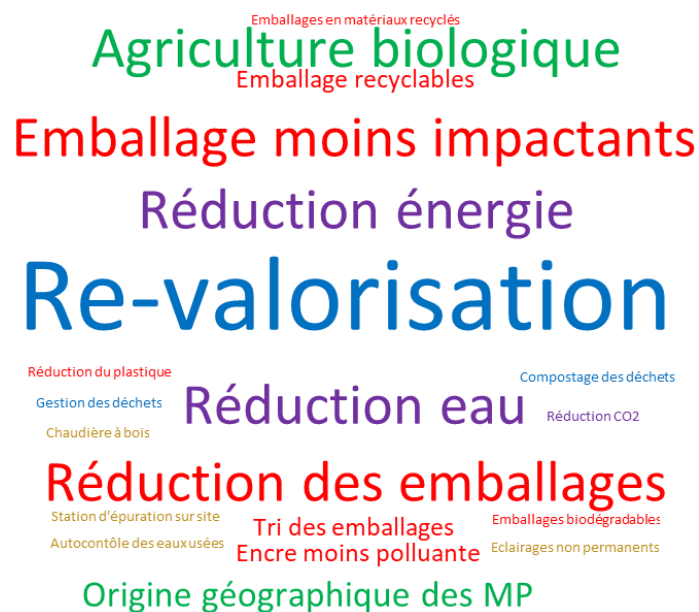


Figure 5.4. Critères environnementaux mentionnés par les professionnels interrogés (tous modèles confondus) ; MP : matières premières

Les critères mentionnés comme étant en lien avec la qualité environnementale des modèles se répartissent sur deux échelles : l'échelle du produit et l'échelle du site. Un critère à l'échelle du site est issu d'un raisonnement sur l'ensemble du site de production et peut être indépendant de toute action vis-à-vis du produit. Dans un rapport intitulé « Comment promouvoir l'écoconception auprès des filières agricoles et agro-alimentaires », l'ADEME a conclu que les principales actions d'écoconception mises en avant par les entreprises interrogées étaient en lien avec l'eau, l'énergie, les emballages et les déchets, ce qui est cohérent avec les résultats que nous avons obtenus (ADEME, 2017).

5.3.2.1. Indicateurs à l'échelle du produit

5.3.2.1.1. Emballages

Les critères en lien avec les emballages ont été les plus mentionnés, montrant que la reconception des emballages est perçue par ces professionnels comme une voie particulièrement importante pour la réduction des impacts environnementaux. Ceci peut s'expliquer par le fait que la réduction des emballages fait l'objet de réglementations européennes depuis de nombreuses années, poussant ainsi les entreprises à écoconcevoir en ce sens. A titre d'exemple, on peut citer la directive 94/62/CE du Parlement européen et du Conseil relative aux emballages et aux déchets d'emballages. De plus, les réglementations en termes d'emballage sont toujours d'actualité. La loi sur l'économie circulaire vise notamment à interdire l'usage des plastiques à usage unique. Afin de réduire les impacts environnementaux liés aux emballages, deux stratégies émergent des réponses obtenues auprès des participants : la réduction de la quantité d'emballage et l'utilisation de matériaux d'emballage considérés par les personnes interrogées comme moins néfastes (emballages *recyclés*, *recyclables*,

biodégradables). Il apparaît dans plusieurs entretiens que l'objectif est de réduire l'utilisation du plastique aux profits de matériaux *recyclables* tels que le verre ou encore l'aluminium. Plusieurs professionnels interrogés semblent ainsi avoir une vision vertueuse de ces emballages dont le recyclage est pourtant très énergivore, notamment pour le verre (Bertoluci et al., 2014). Une meilleure information des professionnels vis-à-vis des impacts environnementaux liés au recyclage d'emballages recyclables tels que le verre pourrait être utile pour éviter le raccourci selon lequel un emballage recyclable a forcément de faibles impacts environnementaux.

La volonté d'utiliser des emballages biodégradables se heurtant à la difficulté de trouver des solutions d'emballage biodégradables garantissant la sécurité sanitaire du produit a également été soulevée. Des recherches sur le développement d'emballages biodégradables et sûrs pour une utilisation agroalimentaire sont actuellement en cours d'après un des professionnels interrogés. L'utilisation d'une encre plus respectueuse de l'environnement pour le packaging a également été mentionnée à deux reprises. Ainsi, les actions menées dans le but de réduire les impacts environnementaux liés aux emballages des produits alimentaires sont nombreuses. Néanmoins, si l'on en croit la littérature scientifique, bien que la reconception des emballages alimentaires permette une réduction de leurs impacts environnementaux (Pauer et al., 2019), les emballages ne sont, le plus souvent, pas les principaux contributeurs aux impacts environnementaux du produit final, contrairement à la production agricole des matières premières (Roy et al., 2009). En effet, Garnett (2011) estime que seulement 7% des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la chaîne alimentaire sont liés aux emballages. Il est donc évident que la reconception des emballages ne suffise pas seule à réduire significativement les impacts environnementaux des produits alimentaires, sauf dans les cas où l'emballage constitue la principale source d'impacts du produit final. Pour autant, cette stratégie ne doit pas être écartée mais pourrait être couplée à une re-conception des produits eux-mêmes notamment via le choix des ingrédients. Il est également à noter que, dans certains contextes, les emballages peuvent permettre de réduire les pertes et gaspillages alimentaires, ayant ainsi une action environnementale bénéfique (Lemaire and Limbourg, 2019).

5.3.2.1.2. Origine géographique des matières premières

L'origine géographique des matières premières a été mise en avant par certains des participants, en particulier l'origine *locale* ou *française* qui est perçue comme bénéfique sur le plan environnemental. Ce choix permet de réduire les distances parcourues par les ingrédients, bien que cela soit tout de même discutable si l'usine se situe plus proche d'un pays frontalier que du lieu de production de l'ingrédient. Néanmoins, l'étape de transport n'est pas l'étape de la chaîne alimentaire la plus impactante sur l'environnement. En effet, d'après la revue de Garnett (2011), le transport serait responsable de 12% des émissions de gaz à effet de serre liées à la chaîne alimentaire tandis que 40% seraient liés à la phase agricole. Une étude récente publiée dans Nature Food estime quant à elle que la contribution des transports aux émissions de gaz à effet de serre pouvait atteindre jusqu'à 19% des émissions liées au système alimentaire global (Li et al., 2022). En France, la contribution des transports des denrées alimentaires aux

émissions de gaz à effet de serre liées à l'alimentation des français est estimée à 13.5% tandis que les émissions liées à la phase agricole sont estimées à 67% (Barbier et al., 2019). De ce fait, les émissions de gaz à effet de serre liées à notre alimentation sont davantage impactées par les choix alimentaires des consommateurs que par les distances parcourues par les aliments. Une étude menée aux Etats-Unis par Weber et Matthews (2008) a ainsi montré que le fait de remplacer la viande rouge et les produits laitiers par d'autres sources de protéines (animales ou végétales) à raison d'une fois par semaine permettait à un américain moyen de réduire davantage les émissions de gaz à effet de serre liées à son alimentation qu'en achetant l'ensemble de ses aliments localement. De plus, une réduction de la distance de transport des produits alimentaires ne permet pas forcément une réduction des impacts environnementaux liés à l'étape de transport. En effet, un transport en cargo ou en train peut être moins impactant sur de longues distances qu'un transport en camionnette sur de plus petites distances (Stein et Santini, 2022). Ainsi, les systèmes locaux ne sont pas forcément préférables aux systèmes conventionnels en termes d'impacts environnementaux, bien qu'ils puissent l'être dans certains cas. Pour cette raison, le fait de choisir des matières premières produites localement n'entraîne pas forcément une réduction des impacts environnementaux du produit final. Néanmoins, sélectionner l'origine géographique permet d'exclure certaines pratiques controversées. En ce sens, la sélection géographique des ingrédients peut donc être un critère intéressant pour améliorer la qualité environnementale du produit final. De plus, la notion d'aliment « local » n'est pas clairement définie et n'englobe pas uniquement la distance parcourue par l'aliment. En effet, les entretiens menés par Bazzani et Canavari (2017) auprès de consommateurs, de fermiers et d'experts du marché de l'alimentation ont montré que le terme « local » tendait à être davantage associé à une notion de traditions alimentaires propres à une communauté et à une zone géographique qu'à une distance parcourue par le produit avant d'être consommé. Le choix de produits locaux permet également des avantages sociaux tels qu'une meilleure autonomie alimentaire des territoires. Quoi qu'il en soit, la stratégie de choisir des ingrédients locaux peut être intéressante dans une démarche de réduction des impacts environnementaux d'un produit alimentaire, mais les effets bénéfiques ne sont pas systématiques et doivent donc être vérifiés.

5.3.2.1.3. Agriculture biologique

Le choix d'ingrédients issus de l'agriculture biologique fait partie des actions menées par certaines entreprises dans le but d'améliorer la qualité environnementale de leurs produits. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le label d'agriculture biologique est l'indicateur de durabilité permettant d'augmenter le plus la demande pour un produit dans un contexte BtoB (Palacios-Argüello et al., 2020). Ainsi, si l'origine biologique des ingrédients permet au produit d'être plus demandé, il est logique que les entreprises s'y intéressent. Toutefois, l'intérêt de l'agriculture biologique pour la réduction des impacts environnementaux liés à l'alimentation humaine fait l'objet de débats dans la littérature scientifique (Debuschewitz et Sanders, 2022). Ainsi, il semblerait que l'agriculture biologique puisse avoir des bénéfices sur certains

indicateurs environnementaux et des inconvénients sur d'autres. En effet, Reganold et Wachter (2016) relatent que les systèmes d'agriculture biologique érodent moins le sol que les systèmes conventionnels et favorisent en général une plus grande diversité d'espèces animales et végétales mais nécessitent bien souvent davantage de terres que leurs équivalents conventionnels. De plus, l'unité fonctionnelle choisie pour l'évaluation a une influence sur les résultats et peut faire pencher la balance en faveur des systèmes biologiques ou des systèmes conventionnels. La méta-analyse de Tuomisto et al. (2012) révèle ainsi que les cultures biologiques génèrent moins d'écoulements de nitrates et moins d'émissions d'oxyde d'azote et d'ammoniaque que les cultures conventionnelles pour une unité fonctionnelle basée sur le champ tandis qu'avec une unité fonctionnelle basée sur le produit, ces résultats sont inversés.

A l'aube d'un affichage environnemental des produits alimentaires, la place des produits alimentaires biologiques fait également débat en France. Ainsi, la base de données AGRIBALYSE 3.0, susceptible de servir de base scientifique à l'affichage environnemental des produits alimentaires, a fait l'objet de critiques vis-à-vis de son évaluation des produits issus de l'agriculture biologique. En cause notamment, le fait que la base de données repose sur l'ACV qui favoriserait les systèmes intensifs aux systèmes de production biologiques (ITAB, 2020). Parmi les limites mentionnées, on retrouve le fait que l'unité fonctionnelle utilisée soit 1 kg de produit et que les ACV reposent sur le paradigme du « land sparing ». Le land sparing fait référence à une volonté de produire le plus possible sur un espace le plus restreint possible dans l'optique de limiter ainsi l'espace agricole au profit des espaces naturels. Inversement, la notion de land sharing fait référence à des systèmes agricoles plus extensifs, prenant ainsi davantage d'espace mais respectant le maintien d'une certaine biodiversité au sein des terres agricoles. Néanmoins, les arguments selon lesquels l'ACV pénaliserait les systèmes extensifs au profit des systèmes intensifs sont contestés par les spécialistes Yannick Biard, Arnaud Hélias et Hayo van der Werf (Le Monde, 2021). Ces derniers expliquent d'ailleurs que selon la « World Food LCA Database » présentant différentes productions agricoles à travers le monde, les systèmes « prairies » apparaissent comme ayant moins d'impacts environnementaux que les systèmes Feedlots (intensifs) américains.

Van der Werf et al. (2020) considèrent qu'afin de mieux évaluer les performances environnementales des systèmes agricoles extensifs par ACV, il est important d'adopter une perspective plus large que la perspective « produit ». Ils recommandent également une meilleure prise en compte des effets négatifs des pratiques agricoles sur la santé des sols et sur la biodiversité, notamment en lien avec les impacts négatifs des pesticides.

Malgré les débats actuels, la commission européenne se montre favorable à une augmentation des parcelles dédiées à l'agriculture biologique au détriment des parcelles dédiées à une agriculture conventionnelle. En effet, elle ambitionne qu'un minimum de 25% des terres agricoles soient dédiées à l'agriculture biologique d'ici 2030 grâce à sa stratégie « Farm to Fork Strategy » (Commission européenne, 2020).

De plus, le potentiel intérêt de l'agriculture biologique par rapport à l'agriculture conventionnelle ne se limite pas à la dimension environnementale. En effet, Reganold et

Wachter (2016) rapportent que l'agriculture biologique permet la production d'aliments au moins aussi nutritifs et avec moins (voire pas du tout) de résidus de pesticides de synthèse. Une revue de littérature conduite par Mie et al. (2017) conclut que la consommation d'aliments issus de l'agriculture biologique pourrait permettre de réduire le risque de maladies allergiques, de surpoids et d'obésité mais que les preuves ne sont pas suffisantes du fait que les consommateurs de produits issus de l'agriculture biologique ont également tendance à avoir un mode de vie plus sain que les autres consommateurs. Les produits laitiers issus de l'agriculture biologique auraient également tendance à contenir plus d'oméga trois que les produits laitiers conventionnels, bien que la différence soit faible. Par ailleurs, l'élevage biologique présente également l'avantage d'utiliser moins d'antibiotiques que l'élevage conventionnel (Mie et al., 2017). De ce fait, le choix d'ingrédients issus de l'agriculture biologique pourrait permettre une amélioration des dimensions sanitaire/sécurité et nutrition/santé des produits alimentaires. Ceci explique que l'origine biologique des ingrédients n'ait pas toujours été mentionnée comme un indicateur de qualité environnementale par les professionnels interrogés. Enfin, un des participants a précisé que la volonté de son entreprise de fabriquer des produits certifiés Agriculture Biologique était drivée par une demande croissante de la part des consommateurs. Une augmentation du nombre de produits alimentaires biologiques est donc à prévoir sur le marché français au cours des prochaines années.

5.3.2.2. Indicateurs à l'échelle du site de production

A l'échelle du site, on peut distinguer la réduction des intrants et la réduction des sortants.

5.3.2.2.1. Réduction des intrants

La réduction des intrants concerne principalement les consommations d'eau et d'énergie à l'échelle du site de production (chacune ayant été citée à 4 reprises au total). Néanmoins, il a été mis en évidence par l'un des participants que la réglementation française pouvait parfois être un frein au déploiement de pratiques plus durables en termes de réduction des intrants. C'est le cas par exemple de la réutilisation des eaux usées sur site qui est aujourd'hui encore interdite en France pour les industries agroalimentaires. La réutilisation des eaux usées sur site serait cependant un bon moyen de réduire les consommations d'eau ce qui serait particulièrement intéressant pour les industries agroalimentaires qui sont bien souvent très consommatrices d'eau (nettoyage des matières premières, des équipements, ...). Cette interdiction est due au Code de la santé publique en lien avec le règlement européen relatif à l'hygiène des denrées alimentaires qui impose une qualité d'eau irréprochable et une absence de toute contamination microbiologique pour les industries agroalimentaires. Des sites de production agroalimentaires situés dans d'autres pays européens que la France utilisent pour autant des techniques de recyclages des eaux usées. On peut donc envisager que la France suive cette dynamique dans les années à venir. De plus, la réduction des consommations énergétiques d'un site de production peut permettre de réduire efficacement les impacts d'un

produit alimentaire sur les indicateurs environnementaux les plus sensibles à la consommation énergétique, particulièrement pour les sites de production énergivore comme nous l'avons discuté dans le Chapitre 2, ce qui en fait une stratégie intéressante.

5.3.2.2.2. Réduction des sortants

Des objectifs de réduction des sortants ont été mis en avant par plusieurs participants. La réduction des émissions de CO₂ (associées aux fuites de liquides frigorigènes par la personne interrogée) a été présentée comme une action menée en faveur de l'environnement par l'entreprise. On peut ici préciser que les fuites de fluides frigorigènes n'émettent pas de CO₂ mais des hydrofluorocarbures (HFC) qui sont de puissants gaz à effet de serre. Ce raccourci met en relief le manque de connaissances que peuvent avoir certains professionnels de l'agroalimentaire vis-à-vis de la dimension environnementale et la nécessité d'une meilleure formation de ces professionnels aux questions environnementales. La gestion des emballages à l'échelle du site semble également être un aspect important aux yeux des personnes interrogées. Le tri des emballages (par exemple des ingrédients) a ainsi été mentionné de même que le compostage des déchets. Également, la revalorisation des biodéchets/produits non conformes/co-produits est une notion revenue à 7 reprises (appelée « Re-valorisation » sur la figure 5.4). Cette revalorisation peut prendre différentes formes : distribution des produits non conformes aux employés ou à des associations (cité par un professionnel du secteur des pizzas), utilisation des produits non conformes pour faire d'autres produits (ex : si un fromage a un défaut visuel, il peut servir à faire des fromages de fonte ou encore des fromages tranchés). Pour les fromages, la revalorisation du lactosérum pour faire des protéines en poudre a également été citée. En ce qui concerne les biodéchets ou les produits non conformes présentant un risque pour la santé, la méthanisation ou le compostage seront préférés d'après les participants. Ces modes de valorisation des biodéchets sont courants en agroalimentaire. En effet, d'après Agreste (2020), 66% des déchets organiques générés par l'industrie agroalimentaire servent à alimenter d'autres filières de production telle que la production d'aliments pour animaux, 11% sont quant à eux valorisés comme engrais (épandage) et 11% sont valorisés par méthanisation. Cette volonté de réduire les déchets est cohérente avec les conclusions de la revue de littérature menée par Bigliardi et Filippelli (2022), qui ont mis en évidence que la gestion des déchets produits tout au long de la chaîne agroalimentaire était un sujet très abordé en lien avec l'innovation dans l'agroalimentaire dans le but d'en améliorer la durabilité. Cette gestion des déchets peut présenter un intérêt environnemental et économique mais résulte principalement d'une contrainte réglementaire. En effet, depuis le 1^{er} janvier 2012, « les personnes qui produisent ou détiennent une quantité importante de biodéchets ont l'obligation de trier ces biodéchets et de les faire valoriser dans des filières adaptées (telles que le compostage ou la méthanisation) » (Ministère de la transition écologique, 2022b).

5.3.2.3. Le cas des entreprises à positionnement « durable »

Les actions menées par les entreprises ayant un positionnement durable dans un objectif de réduction des impacts environnementaux sont assez similaires à celles présentées dans la section précédente. On retrouve ainsi la réduction des emballages, l'utilisation d'emballages recyclés ou recyclables, la revalorisation des produits non conformes et des biodéchets, la réduction des distances parcourues via un approvisionnement le plus local possible, la réduction de la consommation d'eau et d'énergie du site de production et l'utilisation d'ingrédients issus de l'agriculture biologique. L'agriculture raisonnée ainsi que le choix d'agriculteurs favorisant la biodiversité sur leurs parcelles comme fournisseurs ont également été mentionnés. Dans leur communication au grand public, certaines de ces actions sont également mentionnées par de grandes entreprises. Par exemple, Herta signale l'utilisation de matériaux recyclés dans leurs emballages ainsi qu'une réduction de ces derniers permettant de limiter le nombre de camions nécessaires au transport des produits. Magali Sartre, directrice RSE de Bel met quant à elle en avant la réduction de la consommation d'eau du site de production (L'opinion, 2016). Ceci tend à confirmer que ces indicateurs sont effectivement perçus comme des indicateurs de durabilité au sein de la communauté des industries agroalimentaires, mais pas uniquement par les entreprises ayant un positionnement durable.

La réduction du gaspillage alimentaire grâce à l'utilisation de matières premières qui auraient été jetées sans l'action de l'entreprise a également été citée par deux des trois personnes interrogées. C'est le cas par exemple d'une entreprise utilisant des invendus de pain pour fabriquer ses biscuits. Ceci laisse à penser que les entreprises ayant un positionnement durable prennent davantage en compte l'intérêt de la formulation des produits dans la réduction de leurs impacts environnementaux. Ceci apparaît comme une stratégie intéressante pour réduire les impacts environnementaux des produits alimentaires qui sont fortement liés à la production agricole des ingrédients. Néanmoins, le bénéfice environnemental que présente cette solution n'est pas forcément évalué par ces entreprises. Bien que ceci n'ait pas été mentionné par les personnes interrogées, une difficulté méthodologique à l'évaluation environnementale de ce type de produits utilisant des invendus se pose. En effet, il n'existe pas, à l'heure actuelle, de consensus pour la réalisation d'ACV sur ce type de produit et une ACV classique pourrait conduire à des résultats trompeurs. Un exemple de résultat possible avec une ACV classique serait que le fait de jeter les pains invendus aurait moins d'impacts environnementaux que de les transporter, les transformer en un nouveau produit et les emballer. Cette difficulté s'est posée à nous lors de l'étude présentée dans le Chapitre 4 puisqu'avec une ACV classique, il apparaissait comme meilleur pour l'environnement de jeter les restes de pizzas plutôt que de les conserver et de les réchauffer plus tard afin de les consommer. L'adoption d'une perspective plus large que la perspective produit pourrait être intéressante pour évaluer la performance environnementale de ce type de produit recyclant des produits déjà existants. Quoi qu'il en soit, le fait que les avantages environnementaux mis en avant par une marque ne soient pas obligatoirement évalués scientifiquement pose question quant à la robustesse des éléments avancés. Afin de faire face à ce problème, un cadre réglementaire se met actuellement en place. En effet, le gouvernement a publié en avril 2022 un décret d'application de la loi « climat et

résilience » visant à règlementer les communications des entreprises en termes de compensation ou de neutralité en carbone. Ainsi, dès janvier 2023, les entreprises ne pourront plus parler de neutralité carbone d'un produit sans avoir fourni un bilan de ses émissions de gaz à effet de serre réalisé sur l'ensemble de son cycle de vie (Légifrance, 2022).

5.3.2.4. Freins à la prise en compte de la qualité environnementale des produits

Parmi les explications fournies par certains des professionnels interrogés, le manque de prise en considération de la dimension environnementale pourrait s'expliquer de différentes manières. Il a notamment été mentionné qu'un manque de temps et un manque de connaissances des employés pouvaient en être à l'origine. Le coût associé (à la fois pour évaluer les impacts environnementaux des produits et faire les changements nécessaires) est également perçu comme un frein. Une des personnes interrogées a ainsi spécifié que *l'aspect environnement ne sera pris en compte que s'il est économique ou s'il permet de se démarquer d'un point de vue marketing*. De même, un des professionnels a fait part de son regret d'avoir dépensé une somme importante pour faire réaliser l'ACV de ses produits par un cabinet spécialisé car le résultat n'était pas à la hauteur de ses espérances. Il a en effet confié être déçu des délais (plusieurs mois), du manque de précision de cette méthode (avec des marges d'erreurs importantes liées aux bases de données utilisées), ainsi que de la difficulté d'interprétation des résultats du fait des indicateurs qui se *contredisent*. Le coût des investissements nécessaires est le premier frein à la mise en place d'un management environnemental via la mise en place de la norme ISO 14001 d'après une étude de Carrillo-Labella et al. (2020) réalisée auprès de professionnels du secteur de l'huile d'olive. Dans cette étude, le temps à consacrer aux démarches administratives est le deuxième frein cité. L'aspect financier se fait également ressentir à l'échelle des consommateurs puisqu'une étude a révélé que le prix était le principal frein à une alimentation plus responsable d'un point de vue environnemental (LSA, 2020). De plus, le manque de connaissances internes en matière d'évaluation environnementale a également été mis en évidence comme étant un frein au déploiement de l'écoconception par l'ADEME (ADEME, 2017), de même qu'un manque de conviction de la part des équipes dirigeantes.

Ceci met en relief la nécessité d'outils adaptés permettant d'aider les professionnels du secteur à prendre en compte la dimension environnementale plus facilement et à moindre coût. Également, une meilleure formation des professionnels de l'agroalimentaire (actuellement en poste ou lors de leur scolarité) à la dimension environnementale ainsi qu'à l'utilisation des outils d'évaluation des impacts environnementaux et à l'interprétation de leurs résultats semble nécessaire. Cela permettrait d'une part de faire prendre conscience aux professionnels des problématiques liées à l'environnement et d'autre part de réduire les coûts associés à l'évaluation des impacts des produits au sein d'une entreprise. Des aides de l'Etat pourraient également être bienvenues, notamment pour les petites entreprises. Un des participants a d'ailleurs conclu que, selon lui, une meilleure prise en compte de la dimension environnementale *va se faire* mais qu'il faudra pour cela que les entreprises soient bien

accompagnées par l'Etat car ce n'est pas leur *cœur de métier*. Ceci laisse à penser qu'un accompagnement de l'Etat pouvant prendre différentes formes (ex : formations, subventions) pourrait permettre d'aider les entreprises à fabriquer des produits plus respectueux de l'environnement. D'autres entités peuvent également jouer un rôle dans cet accompagnement tels que les instituts techniques, les interprofessions ou encore la recherche publique. Massoud et al. (2010) avaient également conclu que le fait que la mise en place de la norme ISO 14001 n'était pas une exigence légale était un frein à sa mise en application au sein des entreprises libanaises. Inclure la mise en place d'un management environnemental dans la réglementation pourrait donc permettre sa mise en place systématique au sein des entreprises.

De plus, la nécessité d'impliquer l'ensemble des acteurs de la chaîne dans la démarche a également été mentionnée par l'un des participants. Ainsi, si les acheteurs ne sont pas enclins à acheter des produits éco-conçus, l'amélioration environnementale n'aura pas lieu. Or, à l'heure actuelle, les critères de qualité environnementale d'intérêt pour les professionnels du secteur agroalimentaire sont discutables tels que l'origine agriculture biologique et/ou locale des ingrédients. Ces deux critères sont pourtant ceux permettant la plus grosse augmentation de la demande pour un produit dans le cadre d'une transaction BtoB (Palacios-Argüello et al., 2020). Inversement, les émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie du produit ne constituent pas un élément susceptible d'augmenter significativement la demande pour un produit alimentaire (Palacios-Argüello et al., 2020). L'ADEME a également mis en évidence que la difficulté à intégrer des critères environnementaux dans les achats (ex : via cahier des charges clients) ainsi que le manque d'information à ce sujet de la part des fournisseurs étaient des freins au déploiement de l'écoconception. De ce fait, un travail d'information et de communication auprès des professionnels de l'ensemble de la chaîne de valeur et des consommateurs semble nécessaire. Ceci permettrait que les produits présentant un réel intérêt environnemental puissent être valorisés. Quoiqu'il en soit, les attentes des consommateurs étant les drivers principaux des innovations agroalimentaires, nous pouvons prévoir que leur intérêt grandissant pour la qualité environnementale de leur alimentation (Soler et al., 2020) pousse les entreprises agroalimentaires à écoconcevoir de plus en plus. Reste alors à s'assurer des bénéfices environnementaux réels de ces actions.

5.4. CONCLUSION DU CHAPITRE 5

Les entretiens réalisés laissent à penser que la dimension environnementale n'est pas une priorité pour les entreprises agroalimentaires. Les freins évoqués comme pouvant être à l'origine d'un manque de prise en compte de la dimension environnementale au sein de l'entreprise sont principalement le coût, le manque de temps ainsi que le manque de compétences en interne. De ce fait, il est possible qu'une aide gouvernementale sous forme de subventions et/ou de formations puisse permettre d'accroître la prise en compte de la dimension environnementale, tout particulièrement pour les entreprises de petite taille.

Également, il semblerait que la dimension environnementale ne soit pas perçue comme une

partie intégrante de la qualité d'un produit alimentaire puisqu'elle n'a été que très rarement mentionnée comme telle par les professionnels interrogés. Des actions censées être bénéfiques pour l'environnement sont toutefois mises en place par la plupart des entreprises interrogées. Ces actions prennent place à différentes échelles. L'échelle principale est celle de site de production où elle se traduit par le suivi de critères relatifs aux consommations, notamment d'eau et d'énergie, et d'actions visant à les réduire. Ceci peut être dû au fait que le site de production est le maillon du cycle de vie du produit sur lequel les professionnels interrogés ont le plus de leviers d'action. Les actions mises en place à l'échelle du produit alimentaire se limitent à des actions d'écoconception d'emballage et de sélection de l'origine des ingrédients (agriculture biologique/origine géographique). Ainsi, pour les entreprises interrogées n'ayant pas de positionnement durable, l'écoconception n'intervient jamais au niveau de la formulation des produits, par exemple par la réduction des ingrédients connus pour être particulièrement néfastes pour l'environnement. Ceci représente un manque évident, étant donné que la production agricole des ingrédients est bien souvent à l'origine d'une large proportion des impacts environnementaux des produits alimentaires. Ce résultat est toutefois à nuancer. En effet, depuis quelques années, l'offre de produits "végétaux" en remplacement des produits animaux dans les secteurs viandes et produits laitiers explose en grande distribution. Ceci montre qu'à l'échelle de l'ensemble des entreprises agroalimentaires, le remplacement d'ingrédients d'origine animale par des ingrédients d'origine végétale est une pratique commune et à priori bénéfique pour l'environnement, bien que cela n'en soit pas forcément l'objectif premier.

Les entretiens conduits ont également mis en évidence que l'efficacité des actions menées dans une optique de réduction des impacts environnementaux n'était pas forcément évaluée. De ce fait, proposer des outils pouvant aider à l'écoconception de produits alimentaires pourrait être un bon moyen d'aider les entreprises à mener des actions d'écoconception efficaces. Ce type d'outil pourrait inclure des éléments en lien avec la formulation du produit, les ingrédients étant un contributeur majeur aux impacts environnementaux des produits alimentaires. Il pourrait également inclure des données liées aux emballages des produits, ce qui permettrait aux entreprises d'une part de valoriser leurs actions actuelles et d'autre part de s'assurer du bénéfice environnemental de leurs actions dont l'objectif est d'accroître la performance environnementale du produit final (ce qui n'est pas systématiquement fait à l'heure actuelle). Le manque de temps, d'argent et de formation des employés aux outils d'évaluation environnementale (notamment ACV) met également en évidence que, pour que les entreprises prennent davantage en compte la dimension environnementale, il est impératif que les outils proposés soient faciles d'utilisation et d'interprétation et ne nécessitent pas de larges connaissances en évaluation environnementale. De plus, comme la dimension environnementale n'est actuellement pas une priorité pour la plupart des professionnels interrogés, ces outils devront potentiellement intégrer d'autres dimensions telles que la dimension nutritionnelle et la dimension sensorielle qui semblent d'intérêt pour les professionnels du secteur d'après les entretiens réalisés.

Quoiqu'il en soit, nous pouvons formuler l'hypothèse selon laquelle les entreprises

agroalimentaires vont de plus en plus vouloir inclure la dimension environnementale du fait des préoccupations sociétales grandissantes liées à l'environnement (ex : changement climatique, limite des ressources naturelles, ...) ainsi que de l'affichage environnemental à venir. En effet, l'affichage environnemental des produits alimentaires pourrait permettre d'accroître la prise en compte de la performance environnementale des produits alimentaires par des entreprises agroalimentaires, comme cela fut le cas pour la dimension nutritionnelle suite à la mise en place du Nutri-score. Également, nous pouvons supposer que le fait que le score environnemental apparaisse sous forme de logo pousse les fabricants mais également les consommateurs à considérer la performance environnementale comme une dimension de la qualité intrinsèque au produit, contrairement à ce qui semble être le cas actuellement. De plus, les résultats montrent que la réduction des impacts environnementaux liés au site de production semble importante aux yeux des professionnels du secteur et il serait donc pertinent que le score environnemental proposé en tienne compte, afin de valoriser les actions actuellement menées par les entreprises auprès des consommateurs.

CHAPITRE 6 : DEVELOPPEMENT D'UN OUTIL MULTICRITERE D'AIDE A LA CONCEPTION DE PRODUITS ALIMENTAIRES PRENANT EN COMPTE DIFFERENTES DIMENSIONS DE LA QUALITE : ENVIRONNEMENTALE, NUTRITIONNELLE ET SENSORIELLE (ARTICLE 5)

Les chapitres 2 et 3 ont permis de mettre en évidence que la qualité environnementale pouvait ne pas être corrélée positivement à d'autres dimensions de qualité de produits alimentaires telles que la qualité nutritionnelle ou encore la qualité sensorielle au sein d'une même catégorie de produits.

Néanmoins, lors du chapitre 5, il a été montré que les dimensions sensorielles et nutritionnelles étaient particulièrement importantes pour les professionnels du secteur agroalimentaire, notamment pour les modèles d'études fromages et pizzas. Inversement, la performance environnementale des produits ne semble pas avoir la même importance et peu d'actions semblent être menées à l'échelle de la conception du produit pour permettre de réduire ses impacts environnementaux. De plus, l'ACV ne semble pas être fréquemment utilisée par les entreprises interrogées. Ceci met en évidence la nécessité d'améliorer la prise en compte de la dimension environnementale à l'étape de conception des produits. En effet, il s'agit d'une étape déterminante, notamment du fait que le choix des ingrédients a une influence forte sur les impacts environnementaux du produit final. Pour ce faire, les indicateurs ACV ne semblent pas être les plus appropriés et il apparaît donc important de proposer des indicateurs simplifiés capables de témoigner de la qualité environnementale des produits tout en étant facilement utilisables par les entreprises. D'autre part, l'amélioration de la qualité environnementale des

produits alimentaires ne se fera jamais aux dépens d'autres dimensions de la qualité considérées comme plus importantes, telles que les dimensions nutritionnelle et sensorielle. Il semble donc important de trouver des moyens permettant de prendre en compte simultanément la dimension environnementale et d'autres dimensions de qualité importantes aux yeux des différentes parties prenantes. Le chapitre 4 a montré que l'inclusion de la dimension nutritionnelle lors de l'ACV de produits alimentaires permettait de coupler les dimensions environnementales et nutritionnelles. Néanmoins, plusieurs limites ont été mises en évidence quant à la pertinence de l'utilisation de cette option en conception de produits alimentaires, notamment la difficulté à inclure plus d'une dimension au sein de l'UF.

Pour ces raisons, dans ce chapitre une nouvelle voie est explorée pour coupler la dimension environnementale à d'autres dimensions de qualité, ici qualité nutritionnelle et qualité sensorielle : l'utilisation d'un modèle multicritère d'aide à la décision (MCDA) (Figure 6.1). Notre hypothèse est que cette méthode permet de discriminer des produits alimentaires d'une même catégorie en fonction de leur qualité environnementale, nutritionnelle et sensorielle et de donner des axes de re-conception permettant d'améliorer la qualité globale d'un produit ou d'un prototype. L'article 5 présente ainsi une première approche pouvant servir de preuve de concept visant à déterminer l'intérêt de ce type de modèle pour concevoir ou reconcevoir des produits alimentaires plus respectueux de l'environnement sans négliger d'autres dimensions d'intérêt pour les parties prenantes.

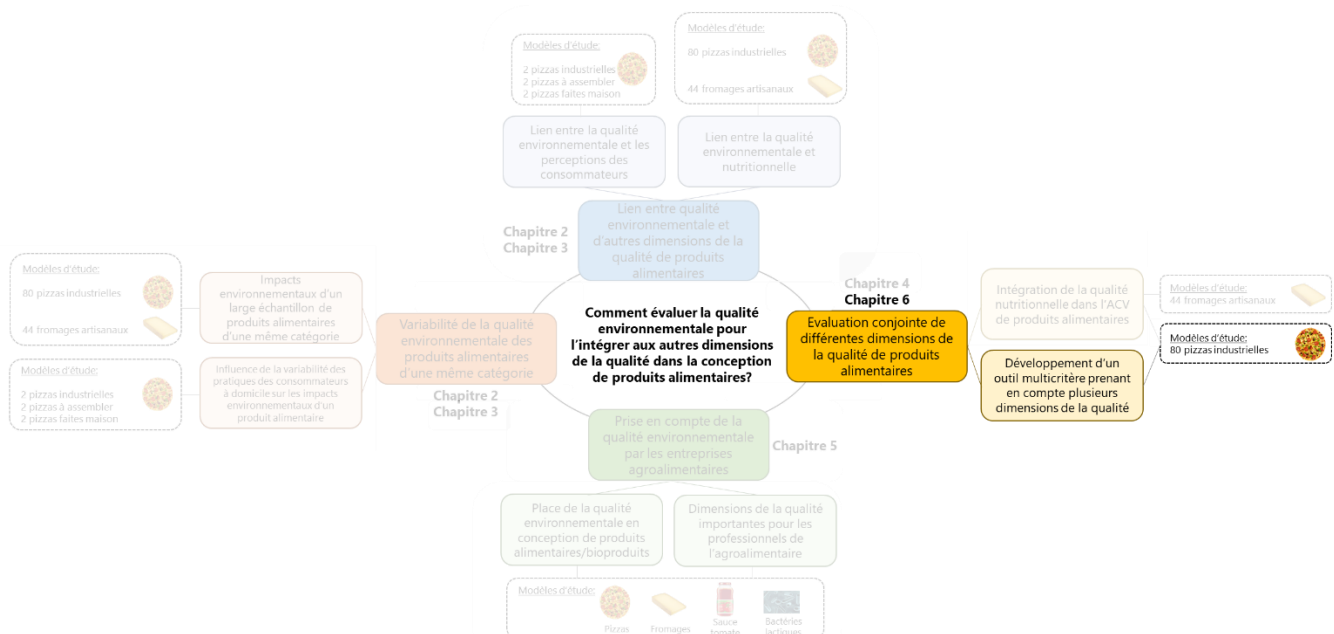


Figure 6.1. Thématiques abordées au sein du chapitre 6

6.1 RESUME

La demande des consommateurs pour des produits présentant une meilleure qualité

nutritionnelle et environnementale est en augmentation. Néanmoins, la qualité sensorielle du produit reste dans de nombreux cas le principal critère de décision des consommateurs lors du choix d'un produit alimentaire. Par conséquent, les entreprises agroalimentaires souhaitant concevoir des produits alimentaires susceptibles de répondre aux attentes des consommateurs doivent jongler avec différentes dimensions de la qualité qui peuvent parfois être contradictoires. Pour ces raisons, l'objectif de l'étude est de développer un outil d'aide à la décision multicritère (MCDA) incluant les dimensions environnementale, nutritionnelle et sensorielle et de démontrer sa capacité à discriminer les produits d'une même catégorie. Le produit ayant été choisi comme modèle d'étude est la pizza industrielle. Afin de déterminer les critères et indicateurs à prendre en compte, des professionnels du secteur des pizzas industrielles ont été interrogés via des entretiens semi-dirigés (présentés dans le chapitre 5). Les informations recueillies ont été utilisées pour développer un modèle multicritère sur le logiciel DEXi. 15 pizzas ont été évaluées à l'aide du modèle, ce qui a permis de mettre en évidence sa capacité à discriminer les pizzas entre elles. Le modèle permet également d'identifier les axes d'améliorations de la qualité d'une pizza donnée. Les pizzas ayant la meilleure qualité globale sont les pizzas contenant des légumes, relativement peu de fromage et parfois du jambon. A l'inverse, les pizzas ayant la moins bonne qualité globale sont les pizzas à forte teneur en fromage ou à forte teneur en crème et en lardons. Ces résultats ont été obtenus en utilisant la même pondération pour chacune des dimensions (environnementale, nutritionnelle et sensorielle) mais ils sont très sensibles à la pondération choisie pour chaque dimension, pouvant être variable selon les utilisateurs. Un tel modèle peut être utile pour les concepteurs de produits alimentaires désireux de mieux intégrer la dimension environnementale dans le processus de conception sans négliger les autres dimensions de la qualité telles les qualités nutritionnelle et sensorielle.

6.2 ARTICLE 5 : MULTICRITERIA CRITERIA DECISION AID MODEL TO SUPPORT FOOD PRODUCT DESIGN INTEGRATING ENVIRONMENTAL, NUTRITIONAL AND SENSORY DIMENSIONS

Article en cours de préparation pour une soumission envisagée à **Foods**.

Multicriteria Criteria Decision Analysis model to support food product design integrating environmental, nutritional and sensory dimensions

Adeline Cortesi¹, Gwenola Yannou-Le Bris¹, Anne Saint-Eve¹, and Caroline Pénicaud¹

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

Abstract

Consumer demand for products with better nutritional and environmental quality is increasing. Nevertheless, the sensory quality of the product remains in many cases the main decision criteria for consumers when choosing a food product. As a result, food companies wishing to design food products likely to satisfy consumer expectations must juggle with different dimensions of quality that may sometimes be contradictory. The objective of the study was to develop Multicriteria Criteria Decision Aid (MCDA) tool including environmental, nutritional and sensory dimensions and to demonstrate its ability to discriminate between products from the same category. Industrial pizzas were selected as a study model. In order to determine the criteria and indicators to be taken into account, professionals of the pizza industry were interviewed via semi-directed interviews. The information gathered was used to develop a multicriteria model on the DEXi software. 15 pizzas were evaluated using the model and results show that the developed model allows a good discrimination between pizzas and highlights where to focus in order to increase one pizza global quality. The pizzas with the overall best quality are pizzas containing vegetable, relatively low cheese and sometimes ham. On the opposite, pizzas with the worse global quality are mainly pizzas with high cheese content or containing beef or high cream and lardons contents. However, results are quite sensitive to the weighting use between the three dimensions, which can be modified by the user. Such a model can be useful for food product designer willing to better include the environmental dimension in the design process without neglecting other quality dimensions such as nutrition and sensory quality.

Keywords: food product; food design; multicriteria; MCDA; DEXi

1. Introduction

The reduction of environmental impacts linked to human activities is one of the main concerns of the 21st century and therefore “responsible consumption and production” is one of the 17 sustainable development goals (UN, 2020). Food production is one of the activities that cause

the most environmental impacts since it is estimated that it constitutes up to 30% of the global European environmental impacts (Tukker et al., 2006). Therefore, consuming more environmentally friendly food products appears to be essential to reduce the global environmental impacts. Nevertheless, consumers would be more willing to replace a product with a more environmentally friendly product coming from the same category than with a more environmentally friendly product coming from a totally different category (Soler et al., 2020). As a consequence, the design of more environmentally friendly food products appears to be a relevant strategy to help consumers reducing the environmental impacts related to their food consumption. The environmental dimension is a new challenge for food industry professionals and comes in addition to older challenges such as product safety, nutritional quality or sensory quality (Augusto, 2020). However, although consumer demand for more environmentally friendly products is on the rise, it appears that environmental quality is not the main criteria for purchase choices, which are more oriented towards the taste, the price or the nutritional quality (Desorge et al., 2017). We can thus hypothesize that the environmental dimension is less important for food companies than other dimensions such as sensory or nutritional quality, since innovation in companies is driven by consumer preferences (Linnemann et al., 2006). For companies wishing to develop more environmentally friendly products while maintaining similar product lines, it is essential that the environmental dimension is not taken into account to the detriment of other dimensions of interest. However, these dimensions are sometimes contradictory. For example, some studies showed that the nutritional quality of a food product could tend to be inversely correlated with its environmental quality ((Masset et al., 2014) and (van Dooren et al., 2017)). Cortesi et al. (2022a) also showed that there was no significant correlations between the nutritional quality (Nutri-Score) and the environmental impacts of 80 pizzas, although pizzas with the highest environmental impacts tend to have the worst Nutri-Score for some environmental indicators. Furthermore, Visschers and Siegrist (2015) showed that there was no correlation between the global warming potentials of dishes served in a canteen and their degree of appreciation by consumers. This shows that the environmental quality of food products is not necessarily positively correlated with their nutritional quality nor with their appreciation by consumers. To face this difficulty and to be able to take into account different potentially contradictory dimensions in food product design, the use of a multicriteria decision analysis (MCDA) method could be useful. Belton and Stewart (2002) defined MCDA as an “umbrella term” used to describe various approaches taking into account different criteria in order to help individuals or groups to make decisions. MCDAs have already been used in various fields, for example healthcare (Drake et al., 2017), waste management (Pažek et al., 2020) or textile industry (Lombardi Netto et al., 2021). At the agricultural level, the model MASC was developed by Sadok et al. (2009) to assess the sustainability of agricultural systems integrating environmental, economic and social dimensions, each subdivided into different sub-criteria and developed on the DEXi software. The DEXi software is based on DEX (Decision EXpert), a qualitative multi-attribute decision modelling methodology conceived in 1979 (Bohanec et al., 2013). The principle of DEX consists in decomposing the decision problem into less complex sub-problems which are then hierarchized. DEX was implemented in different

computer programs. The first was DECMAC followed by DEX and finally DEXi since 2000 (Bohanec et al., 2013). The development of models on DEXi requires to define qualitative variables representing the sub-problems of the decision system, qualitative scales (i.e. "high", "medium", "low") that will be used to evaluate these qualitative variables, decision tree decomposing the decision system and "if-then" aggregation rules between the different qualitative variables along the decision tree (Bohanec et al., 2013). DEXi is particularly well suited to the evaluation of the sustainability of agricultural systems, since it is able to manage incommensurability, non-conformity and incomparability of indicators that can be qualitative or quantitative (Sadok et al., 2008). Indeed, DEXi is a qualitative model that converts quantitative data into qualitative data using threshold values, allowing both qualitative and quantitative indicators to be used. Another advantage of DEXi is that it allows a flexible parameterization, i.e., the indicators chosen by the model designer can be modified by the user, as can the threshold values. This makes it possible to offer a base model that can be adapted to the specific expectations of a user. For these reasons, DEXi was used to develop various multicriteria models aiming at assessing the sustainability of agricultural systems. For example, DEXiAqua was developed to assess the sustainability of aquaculture systems (Le Féon et al., 2021) and DEXiFruit for fruit production systems (Alaphilippe et al., 2017). MCDA methods have also been used at the food industry level, for example to design food processes (Madoumier et al., 2019) or assess food product safety risk-benefice (Ruzante et al., 2017). MCDA have also been used for food product development. For example, Yilmaz and Koca (2020) used the TOPSIS multicriteria decision method in order to determine the best formulation of gluten-free bread using nutritional and sensory criteria. However, no study focuses on using a MCDA to help design food products taking into account their environmental performance as well as their nutritional and sensory qualities. Therefore, the main objective of the present study will be to investigate how a multicriteria DEXi model can be developed to help food product design including different quality dimensions of which the environmental dimension. The chosen study model to set up this approach is the industrial pizza for different reasons. The first one is that pizza is a very popular product throughout the world and particularly in France which, with the United States, is the first consumer of pizza per capita (PIC International, 2020). The second reason is that there are many varieties of pizzas available on the French retail market. The last reason is that previous results gave us access to data related to a large number of industrial pizzas (Cortesi et al., 2022b) which will be useful for designing, parameterizing and evaluating the multicriteria model developed.

2. Material and Methods

The main steps recommended by Craheix et al. (2015) in their article intitled « Guidelines to design models assessing agricultural sustainability, based upon feedbacks from the DEXi decision support system" were followed to develop the multicriteria model.

2.1. Initial analysis and planning of the design process

The objective of the tool is to allow food product designers to more easily design food products by considering the environmental, nutritional and sensory dimensions. The main possible uses of the model are:

- Enable the user to benchmark a product within its food category.
- Enable the user to identify the best trade-offs among different design options based on their environmental, nutritional and sensorial qualities;
- Enable the user to improve the pizza quality by identifying ways to re-design it.

Craheix et al. (2015) points out that, although this is not always the case depending on the study, it is important to involve potential future users as much as possible in the model development. Here, the stakeholders to involve in the design of the multicriteria model are professionals from the pizza industry and especially professional from the R&D departments. These stakeholders were included in the selection process of the different criteria and indicators to include in the tool development.

2.2. Criteria and indicator selection and hierarchy

Mendoza et al. (1999) define a criterion as "a principle or standard that a thing is judged by" and an indicator as "any variable or component of the forest ecosystem of management system used to infer the status of a particular criterion". For example, in this study the nutritional quality is a quality criteria of the food product global quality and the protein content is an indicator of the nutritional quality criteria. In the present article, a criterion corresponds to an issue for the quality of the pizza, while an indicator is used to represent and evaluate a criterion. The criteria and indicators to be considered as well as their hierarchy were defined through interviews with pizza industry professionals, scientific literature and governmental reports.

2.2.1. Interview with experts

Interviews with pizza industry professionals were performed in order to determine the dimensions of quality that are important to professionals and associated indicators. Pizza industry professional were recruited. The inclusion criteria for the recruitment of the participants were: the participant should be currently working in an industrial pizza company or used to work there less than 5 years ago and during more than 6 months. The recruitment of these professionals was done through different means such as professional social networks (e.g. LinkedIn), professional networks and alumni networks. The four participants recruited were working in the following departments and companies: R&D department of a large company (more than 5000 employees), R&D department of a medium-sized company (between 250 and 5000 employees), R&D department of a small-sized company (less than 250 employees), quality department of a medium-sized company. Participants were interviewed using semi-structured interviews conducted by phone between April 2020 and December 2020. The prior

consent of the participants was requested in order to record the conversations. In case of a refusal, the conversation was not recorded and only handwritten notes were taken during the interview. The recorded interviews were manually transcribed afterwards. The average length of the interviews was about 30 minutes. The interview grid used is available in "ANNEXE 5". An open-ended question (question (2)) aimed to identify the pizza quality criteria spontaneously mentioned by the participants. Question (3) then aimed to identify the indicators used by the companies to study the previously mentioned criteria. If the environmental dimension has not been spontaneously mentioned, a specific question related to it was then asked (question (5)) in order to collect environmental quality related indicators. These interviews made it possible to determine which dimensions of pizza quality were important for industrial pizzas professionals and to confirm either or not the choice of the nutritional, sensory and environmental dimension was pertinent. The results obtained during the interviews were then analyzed. For this purpose, the main dimensions of quality stated by the interviewees were identified and the indicators mentioned were attributed to one of these dimensions.

2.2.2. Literature review

In addition to interviews with the experts, documents related to nutritional, sensory and environmental qualities of food products (and especially pizzas when possible) were reviewed. Regarding the nutritional dimension, the French governmental recommendations in terms of nutrition were studied (Ministère des solidarités et de la santé, 2019), as well as the Nutri-Score (Chantal et al., 2017), which is the nutritional score used for the nutritional display of food products in France. Both of them allowed us to identify which of the indicators mentioned by the interviewees could be considered to be limited or to be favored. Regarding the sensory dimension, an internal study on the sensory and appreciation profiles of pizzas was studied. A study focusing on the environmental impacts of 80 pizzas representative of the French market was also used to gather information on the environmental dimension (Cortesi et al., 2022a). Main findings highlighted in these documents were then confronted to the indicators from the interviews in order to select the most pertinent ones for the present case study.

2.3. Parameterization

Evaluation scales were defined for each criteria and indicator. The model DEXi is qualitative and therefore the evaluation of criteria and indicators is done in the form of quantitative values such as "good/average/bad" for example. For this reason, the quantitative values of the indicators must be converted into qualitative values using threshold values. In order to define the threshold values of the nutritional and environmental indicators, data related to 65 pizzas from the French retail market (Cortesi et al., 2022b) were used. In this data paper, 80 pizzas were available: 65 were used to define threshold values while the remaining 15 ones were used to test the model. For each indicator, the threshold values were based on percentile values calculated on these data. Thus, for a scale of 3 quantitative values (i.e. good; average; bad), the 1/3 and 2/3 percentiles were used.

Regarding environmental indicators, the higher their value, the worse the environmental impact. Regarding nutritional indicators, it depends if the indicator is based on a component to favor or to limit. Indeed, the qualitative value attributed to the quantitative values lower than the lowest percentile are different according to whether the nutritional indicator is to be favored or limited according to the current French recommendations, as presented in table 1.

Table 1: Qualitative value given to each nutritional indicator depending on its quantitative value.

	Quantitative value < Centile 1/3	Centile 1/3 < Quantitative value < Centile 2/3	Quantitative value > Centile 2/3
Nutritional indicators to limit	Good	Average	Bad
Nutritional indicators to favor	Bad	Average	Good

Regarding the sensory dimension, since DEXi models allow to include qualitative indicators, it could be possible to use qualitative indicators such as the consumers liking for example. However, in the present study, since one of the goal of the developed model is to provide ways to improve the quality of the pizza, quantitative indicators related to the positive or negative appreciation of 16 pizzas by consumers will be used. For each indicator, 128 grades given by 16 different consumers after several pizza testings were used to define threshold values. Qualitative values were then attributed as presented in Table 2.

Table 2: Qualitative value given to each nutritional indicator depending on its quantitative value.

	Quantitative value < Centile 1/3	Centile 1/3 < Quantitative value < Centile 2/3	Quantitative value > Centile 2/3
Indicators related to a negative appreciation	Good	Average	Bad
Indicators related to a positive appreciation	Bad	Average	Good

The decision tree as well as the decision rules selected will be presented in the result section.

2.4. Evaluation

Once the decision tree was built based on the criteria and indicators and their parameterization, the ability of the model to meet the objectives presented in section 2.1. was evaluated. To do so, 15 pizzas from the French retail market for which nutritional, environmental and sensory data were available and have not been used in for the parameterization of the model were selected. The quality of these 15 pizzas was then studied using the model in order to determine

whether or not the model was able to discriminate between the pizzas.

3. Results

3.1. Criteria and indicators definition

In this section, the participants answers will be discussed and confronted to the literature in order to select criteria and indicators. The main quality criteria emerging from the participant answers to question (2) are the following: sensory dimension, functional dimension (e.g. processability of ingredients), economic dimension, and nutritional dimension. These results show that the environmental dimension does not seem to be perceived as a quality dimension of the final product by the participants. This highlights the need to find ways to improve the inclusion of the environmental dimension in food product design. The economic and functional dimensions have been stated more as mandatory constraints. As a result, it can be assumed that the levers for action on these two dimensions are very weak. For these reasons, the quality criteria selected to be included in the multicriteria model were: Nutritional quality, sensory quality, and environmental quality. During the interviews, different indicators related to each of the three criteria were stated. All the nutritional, sensory and environmental quality indicators mentioned by the participants are available in "ANNEXE 6". The following subsections present the indicators selected to be included in the multicriteria model.

3.1.1. Nutritional quality

The nutritional indicators stated by the participants were listed. Among them, aggregated indicator (e.g. nutritional score) were removed. Similarly, indicators for which it was difficult to determine whether a high content is positive or negative for health according to the French nutritional labeling (Nutri-Score) were also removed. Indeed, because of the DEXi software, it is necessary to be able to define whether a high content of a certain nutrient is either good or bad in order to be able to evaluate them on a qualitative scale. The nutritional indicators finally selected are: energy, protein, saturated fatty acid, sodium, fiber, and sugar contents. The nutritional indicators considered to be limited are: energy, saturated fatty acid, sodium, and sugar contents. The nutritional indicators considered to be favored are: fiber and protein contents.

3.1.2. Environmental quality

The participant's answers to question (4) highlighted that the efforts of their companies in terms of reducing environmental impacts were mainly focused on the eco-design of packaging, in particular by reducing the amount of packaging used, by replacing plastic packaging with recyclable materials or by using less polluting inks on the packaging of their products. The revalorization of waste was also mentioned. In addition, the organic origin of the ingredients as well as their geographical origin were mentioned. Therefore, it can be said that the actions taken in favor of the environment are mainly focusing on packaging eco-design, waste

management and the origin of ingredients. Moreover, we noted that the LCA indicators, LCA being the ISO 14040 standard recommends for eco-design, were not mentioned. We can therefore hypothesize that these indicators are not very used by agri-food companies, which may be the result of different parameters (difficulties of use, too time-consuming, results hard to interpret, etc.). For this reason, we have chosen not to use LCA indicators as indicators in the multicriteria model.

In order to identify indicators that are not LCA indicators but that can still represent the environmental performance of the pizza and offer guidelines for professionals of the pizza industry sector to efficiently eco-design their products, the three steps presented in sections 3.1.2.1., 3.1.2.2. and 3.1.2.3. were followed.

3.1.2.1. Environmental assessment of a large number of pizzas

The LCA of 65 different pizzas including all the life cycle of the pizza from the agricultural production of the ingredients to the consumption were used (Cortesi et al., 2022b). More precisely, the single scores, an aggregated score including the different environmental indicators calculated with the EF 3.0 method, were used in order to define threshold values.

3.1.2.2. Definition of threshold values

The 1/3 and 2/3 percentiles were calculated on the single scores of these 65 pizzas. The higher the single score, the higher the global impacts of a pizza on the environment. Therefore, pizzas with a single score lower than the 1/3 percentile will be considered as *good*, pizzas with a single score between the 1/3 percentile and the 2/3 percentile will be considered as *average* and pizzas with a single score higher than the 2/3 percentile will be considered as *bad* in terms of environmental quality.

3.1.2.3. Identification of the pizza characteristics for each group

In order to identify simple indicators able to reflect the environmental quality of pizzas, the characteristics of the pizzas from the three different groups (*bad*, *average* and *good* in terms of single scores) were compared. It appears that the majority of the pizzas from the three groups distinguished in terms of composition. The ingredients that influence the most badly the environmental quality of the pizzas are found to be the ingredients of animal origin but their influence differ from one animal ingredient to another. The ingredients that seem to have the higher influence on the pizzas environmental impacts are beef and ripened cheeses. Figure 1 presents a decision tree that can help users to estimate the environmental performance of their pizza. This decision tree is based on the observations made on the characteristic of the 65 pizzas sample. All the 65 pizzas are represented and the number of pizzas concerned by each tree branch is indicated at the bottom of the figure.

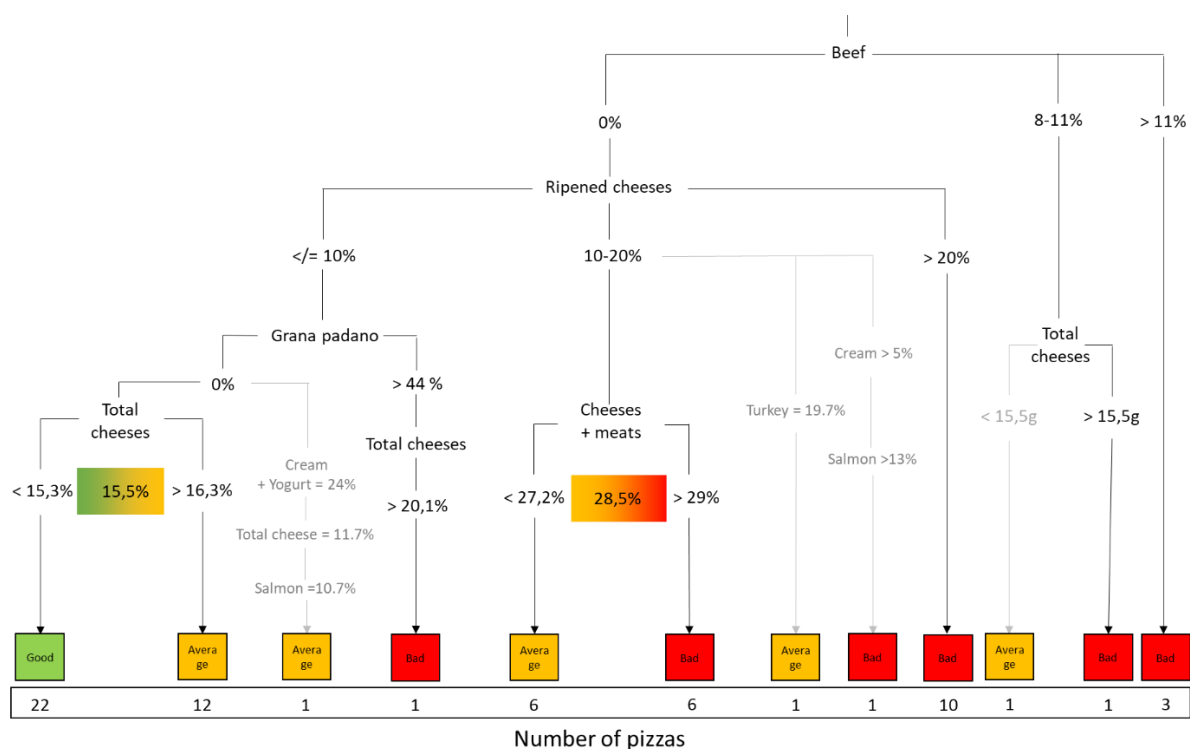


Figure 1. Characteristic of the 3 pizzas groups based on their single scores and the number of pizzas responding to each characteristic (grey: Specific cases that can not be generalized)

It can be said that some characteristics apply for many pizzas (main characteristics) while some pizzas are specific cases meaning that no general rules can be establish based on them since they are only one in the situation (due to the use of some not very common pizza ingredients for example). Therefore, the user can use Figure 1 in order to identify in what group his pizza is more likely to be in but should keep in mind that it can be misleading in the case that one or several ingredients (especially animal origin ingredients) that are not frequently used in the 65 sample are used. However, the 65 pizzas sample is coming from a 80 pizzas sample representative of the French retail market. Therefore, we believe that a majority of combination and commonly used ingredients are included in Figure 1.

The indicators of the decision tree presented in Figure 1 has the advantage of allowing the user to estimate the environmental quality of its pizza without having to carry out an LCA. Also, it allows the user to identify which parameter of the pizza composition needs to be modified in priority in order to achieve a significant reduction of the pizza environmental impacts. However, this does not replace the need to carry out a complete LCA of the pizza later in the development process in order to identify its precise environmental impacts that could be needed by the company in order to communicate finely with retailers or consumers.

Since a lot of actions regarding the eco-design of packaging were reported by participants, an indicator reflecting the environmental performance of the pizza packaging was added. Pizzas packaging are mainly made of cardboard and plastic. As already discussed, the eco-design of packaging can be done mainly by reducing the global weight of the packaging and/or

replacing plastic packaging by recyclable materials. Therefore, the two indicators selected to evaluate the environmental performance of pizza packaging are: weight of plastic and weight of cardboard. The weight of plastic and cardboard contained in the packaging of 65 pizzas (available in Cortesi et al., 2022b) were used to define threshold values for these two indicators.

3.1.3. Sensory quality

The vast majority of the sensory indicators mentioned by the participants can be clustered in three categories: Visual, Taste, and Texture. The attributes selected to represent these three categories are the following.

Visual: Abundance of filling;

Taste: Aromatics herbs content, Acidic, Pungent, Spicy;

Texture: Sticky/doughy bowl, chewability.

These attributes were selected for two reasons. First, they are indicators of the visual, taste and texture categories that seem important for participants. Secondly, a project (unpublished data) has shown that these indicators were associated with a pizza liking profile. This means, for example, that among the pizza sample studied, the richer a pizza was in aromatic herbs, the more it was appreciated by the panelists.

3.2. Tree, weightings and decision rules

Figure 2 presents the decisional tree based on the criteria and indicators selected, as well as the different weightings and types of scale used.

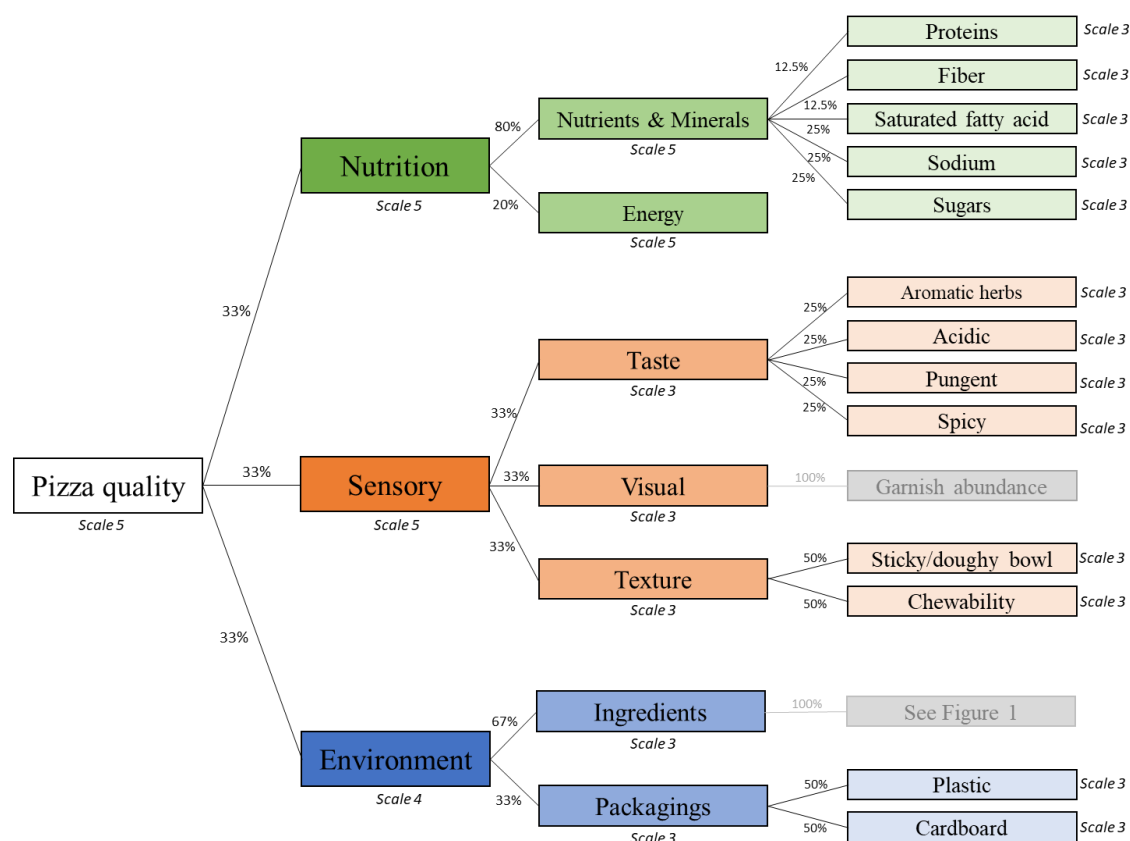


Figure 2. Decisional tree to assess pizza global quality including nutritional, sensory and environmental dimensions. Percentages are the weightings of each branch. The scales 3,4 and 5 define the number of levels describing each criteria and indicator (scale 3: good/average/bad; scale 4: good/average/bad/very bad; scale 5: very good/good/average/bad/very bad). Indicators in grey are indications and are not represented on Dexi.

The *visual* indicator is here described by the abundance of the pizza fillings. The ingredients refer to the global environmental quality of the pizza that can be described by its composition using Figure 1.

Weightings used for the three criteria are equal to each other so each of the three quality dimensions can have the same influence on the global quality. The weightings used for the nutritional indicators were calculated in a way that each component to limit represent 20% of the nutrition criteria and components to favor 10%. For example, protein is a nutrient to favor and therefore represent 10% of the nutrition criteria (12.5% of 80%). This decision was made because, for the Nutri-Score calculation, the weights allocated to components to limit are higher than the ones allocated to components to favor. This way, high contents of components to favor can not compensate high contents of components to limit. Regarding the sensory dimension, the weights were allocated equally between each indicator so that taste, visual and texture contributes the same to the sensory criteria. Regarding the environment criteria, as explained in section 3.1.2., the differences of environmental quality between pizzas can be explained using only their composition in ingredients. However, a packaging indicator was added because eco-design of packaging seems to be an important strategy for the participants

to improve the environmental impacts of their products, as explained in session 3.1.2.3.

Because the contribution of packaging to the overall environmental impact is small compared to that of the ingredients, the decision rules were defined as shown in Table 3.

Table 3: Decision rules used for the environment criteria

	Ingredients	Packaging	Environme
1	Bad	Bad	Very bad
2	Bad	Average	Bad
3	Bad	Good	Bad
4	Average	Bad	Bad
5	Average	Average	Average
6	Average	Good	Average
7	Good	Bad	Average
8	Good	Average	Good
9	Good	Good	Good

Thus, a good grade attributed to the packaging does not allow to improve the global environmental grade but on the contrary a bad grade attributed to the packaging has for consequence to worsen the grade obtained with the ingredients. Therefore, the packaging can only worsen the grade obtained with the ingredients. This could encourage professionals to eco-design their packaging and to value their efforts in this field while reminding them that the eco-design of packaging does not allow to drastically reduce the environmental impacts of a pizza. Decisions rules used are available in "ANNEXE 7".

3.3. Evaluation

In this section, 15 pizzas will be assessed using the model in order to determine how it could contribute to food product design.

3.3.1. 15 pizzas presentation

The selection process of the 15 pizzas was presented in section 2.4. Table 4 shows the composition of these pizzas.

Table 4. Composition of the 15 pizzas studied (for 1kg of pizza)

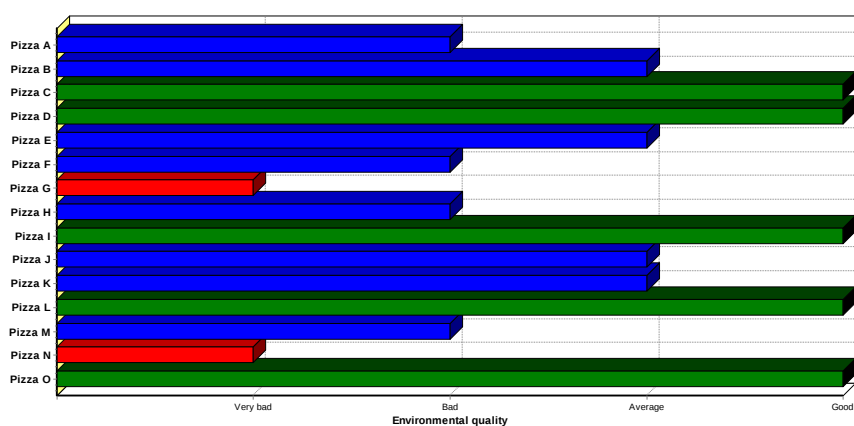
Ingredient (g)	Pizza A	Pizza B	Pizza C	Pizza D	Pizza E	Pizza F	Pizza G	Pizza H	Pizza I	Pizza J	Pizza K	Pizza L	Pizza M	Pizza N	Pizza O
Dough	380	410	471	550	480	500	280	410	546	590	390	450	430	450	450
Tomato sauce	208	201	162	250	224	175	320	162	295	200	190	159	222	0	0
Ham	118	120	107	94											
Lardoons													160	187	
Beef								115							
Turkey															99
Emmental cheese	161	60			7	115	97						108	104	
Comté cheese				106			122	80	73					55	
Edam cheese			154		112	140	90	80			60	110			93
Cheddar cheese															
Gorgonzola					72										

cheese						
Goat cheese		90				
Melted cheese		46	75			
Mozzarella cheese		210			80	
Fresh cream		50			176	258
Mushrooms	99	120	83			
Tomato		47			9	
Pepper		23			90	51
Eggplant					82	
Zucchini					82	
Carrot		47				
Artichoke					46	
Spinach					33	
Olive	31	30	23	20		
Onion		47			30	33
Garlic		35				
Olive oil		20				
Aromatic herbs		38			24	16
Basil	2	2				

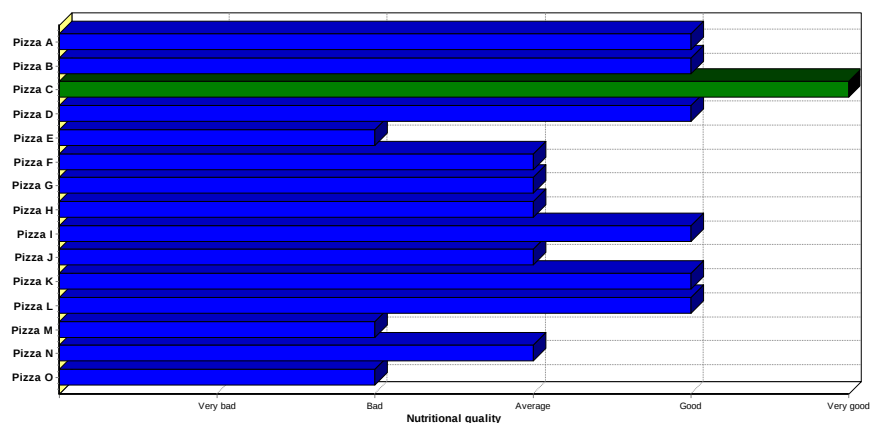
3.3.2. Using the model to benchmark pizzas qualities within pizza category

First of all, the nutritional, environmental and sensory qualities of the 15 pizzas were assessed individually using the multicriteria model. Figure 3 shows the results.

A



B



C

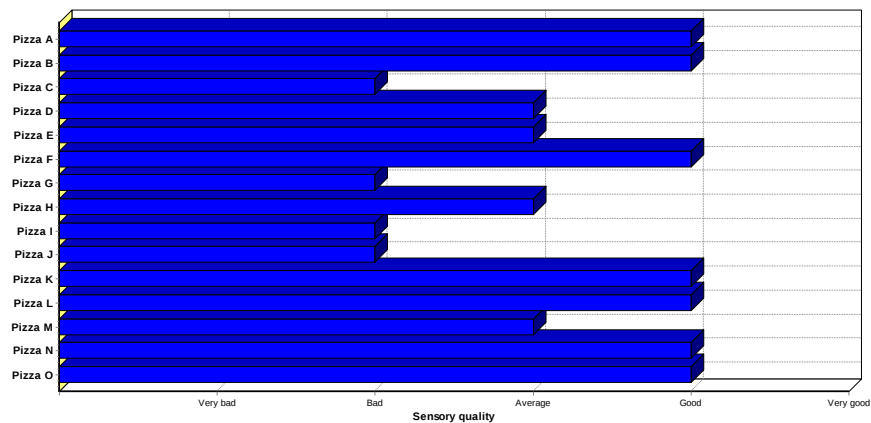


Figure 3. Assessment of the 15 pizzas based on their (A) environmental, (B) nutritional, (C) sensory qualities.

According to figure 3, it can be said that, for most pizzas, at least 2 of the 3 criteria are contradictory. This highlights the interest of using a multicriteria model because they allow to make objective choices despite potential contradictory criteria.

Regarding the environmental quality, as expected, the 4 pizzas with the better ranking (*good*) are the pizzas with globally low cheese content and high vegetable content. 5 of them do not contain any meat while 3 of them contain ham or turkey. On the opposite, pizzas with the worst ranking (*bad* or *very bad*) are pizzas with relatively low vegetable content, high cheese content or high animal product content or containing beef.

Regarding the nutritional quality, the 7 pizzas with the best ranking (*good* or *very good*) are pizzas containing ham and cheese and vegetarian pizzas containing vegetables and cheeses. On the opposite, the 3 pizzas with the worse ranking (*bad*) contain high amounts of cheeses, cream or lardons. This is also logical because these ingredients have especially high amounts of energy and saturated fatty acids, two nutrients that are to limit in order to have a good nutritional quality. Furthermore, ham is high in protein but has a relatively low saturated fatty

acids and energy contents compared to cheese, lardons or fresh cream. Also, vegetable contain less energy and saturated fatty acids and more fiber than cheeses, lardons and fresh cream (ANSES, 2020) which explains why the pizzas containing ham and vegetable tend to have relatively good nutritional quality. Regarding the sensory quality, no general trends are observed regarding the pizza general composition.

3.3.3. Using the model to identify the best trade-off

In this section, the best global trade-off between the 15 pizzas based on the multicriteria model will be identified. Figure 4 shows the comparison of the aggregated global quality obtained for each pizza.

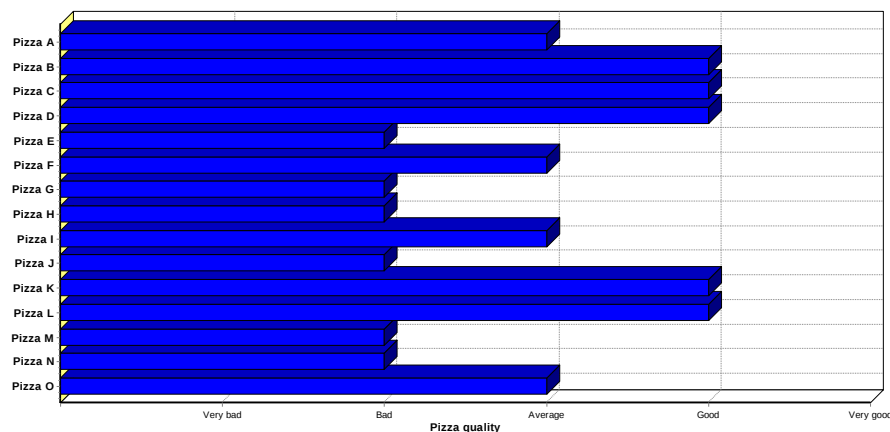


Figure 4. Global pizza qualities defined using the multicriteria model

The multicriteria model discriminates the pizzas, with 5 of the 15 pizzas being ranked as *good*, 4 being ranked *average* et 6 being ranked *bad* (Figure 4). Comparing figure 4 and table 2, it can be said that the 5 pizzas ranked as *good* have the following profile: Relatively low cheese content and relatively high vegetable content. Two of them are vegetarian pizzas containing vegetables (K,L) and three of them are ham-cheese pizzas (B,C,D). Regarding the six pizzas ranked as *bad*, three pizzas are pizzas containing mostly cheese toppings (E,G,J), one is a beef pizza (H), and two pizzas contain cheese and lardons.

3.3.4. Using the model to improve the quality of a pizza

3.3.4.1. Identification of the ways of improvement

In this section, we will explore how the model can help product designer to find ways to improve the global quality of a pizzas. Pizza N was taken as an example because it is one of the pizzas with the worse ranking. According to figure 3, it can be said that the origin of the bad quality of pizza are linked to a very bad environmental quality, and an average nutritional quality, the sensorial quality being good. Figure 5 gives more information about the quality of each indicator.

Attribute	Pizza N
Pizza quality	Bad
Environmental quality	Very bad
Ingredients	Bad
Packaging	Bad
Plastic	Bad
Carboard	Good
Nutritional quality	Average
Energy	Very bad
Nutrients & minerals	Average
Protein	Good
Fiber	Bad
Saturated fatty acids	Bad
Sodium	Average
Sugars	Good
Sensory quality	Good
Visual	Average
Taste	Good
Acidic	Average
Pungent	Average
Spicy	Average
Aromatic herbs taste	Good
Texture	Average
Sticky/Doughy bowl	Average
Chewability	Average

Figure 5. Pizza N quality assessed using the multicriteria model

According to Figure 5, the environmental quality of pizza N can be improved by modifying its recipe based on Figure 1 and reducing the plastic content of its packaging. Its nutritional quality can be improved by reducing the pizza energy and saturated fatty acids contents and increasing the fiber content while maintaining correct protein and sugar contents.

3.3.4.2. Improving the environmental quality

According to Figure 1, pizza N is in the following situation: Ripened cheese > 10% and meats+cheeses > 29%. Therefore, in order to get a better ranking for the ingredient's indicator, cheeses and meats must be reduced to less than 290g. To do so, three ingredients can be replaced or reduced: comté cheese, emmental cheese and lardons. The plastic packaging should also be reduced lower than the 2/3 centile threshold value.

3.3.4.3. Improving the nutritional quality

The nutritional quality can be improved reducing energy and saturated fatty acids and improving fiber content. Among the pizza ingredients, those with the highest energy and saturated fatty acids contents are comté cheese, emmental cheese, lardoons and fresh cream (ANSES, 2020) and the one with the highest fiber content are olives and dough.

3.3.4.4. Hypothetical re-design of pizza N

A reformulation reducing the cheeses and lardon content and increasing the amount of olive can lead to an improvement of the environmental quality as well as a reduction of the pizza contents in energy and fatty acid and an improvement of its fiber content. To go further, the fresh cream based can be replaced by tomato sauce which has more fiber and less saturated fatty acids. The hypothetical reformulation of pizza N is as follows, for 100g of pizza: Emmental cheese content reduced of 3,1g, lardons content reduced of 3,1g, olive content increase of 6,2g and fresh cream replaced by tomato pulp. The plastic packaging was also reduced. The hypothetical re-designed pizza was assessed using the multicriteria model assuming that the sensory indicators values were maintained. Figure 6 shows the comparison of the initial pizza N and the re-designed version of pizza N called pizza N bis.

Evaluation results		
Attribute	Pizza N	Pizza N bis
Pizza quality	Bad	Good
Environmental quality	Very bad	Average
Ingredients	Bad	Average
Packaging	Bad	Average
Plastic	Bad	Average
Carboard	Good	Good
Nutritional quality	Average	Good
Energy	Very bad	Average
Nutrients & minerals	Average	Good
Protein	Good	Average
Fiber	Bad	Good
Saturated fatty acids	Bad	Good
Sodium	Average	Average
Sugars	Good	Average
Sensory quality	Good	Good
Visual	Average	Average
Taste	Good	Good
Acidic	Average	Average
Pungent	Average	Average
Spicy	Average	Average
Aromatic herbs taste	Good	Good
Texture	Average	Average
Sticky/Doughy bowl	Average	Average
Chewability	Average	Average

Figure 5. Pizza N and pizza N bis qualities assessed using the multicriteria model

The re-design of pizza N into pizza N bis improves its environmental quality (which go from *very bad* to *average*) as well as its nutritional quality which goes from *average* to *good* (Figure 5). However, it can be said that while the re-design of pizza N allows an improvement of the energy, fiber, and saturated fatty acids contents, it also induces a lapse of the sugar and protein contents. This is due to the replacement of the fresh cream by the tomato pulp which is richer in sugar and poorer in protein than fresh cream. Also, the global reduction of animal products which are rich in proteins contributes to the decrease of protein content. This shows that the improvement of the nutritional quality is not true for all nutritional indicators. Furthermore, in this example, the sensory quality was supposed to be the same between the initial pizza N and its hypothetical new version pizza N bis which will not necessary be the case in reality. Further research would be needed to understand the influence of this reformulation on the sensory quality of the pizza.

In this example, we wanted to preserve the fundamental ingredients of the pizzas as much as possible. The results show that this type of reformulation can improve the global quality of a pizza. In this case the pizza went from a ranking *bad* to a ranking *good*. However, a better improvement could be achieved by replacing some of the ingredients (for example adding vegetables and replacing part of the ripened cheeses by lean meat such as ham in order to reduce both the energy and fatty acids contents as well as the environmental impacts while preserving the protein content). However, such reformulation would totally change the pizza which will not be the same product anymore and this will probably be unacceptable for the company, as well as the consumers.

3.3.5. Influence of the weighting rules

One of the advantages of the models developed on DEXi is that the users are free to modify the weights, the decision rules and the indicators if they want to. In this section, we studied the effect of the modifications of the weightings between the different criteria (nutrition, environment, sensory) on the results. In order to do this, the participants were contacted once

again in order to define weights corresponding to the importance that each criterion has according to them in a pizza design process. Figure 6 shows the results obtained with two different weightings: weighting A (environment: 20%; nutrition: 40%; sensory: 40%) and weighting B (environment: 10%; nutrition: 30%; sensory: 60%).

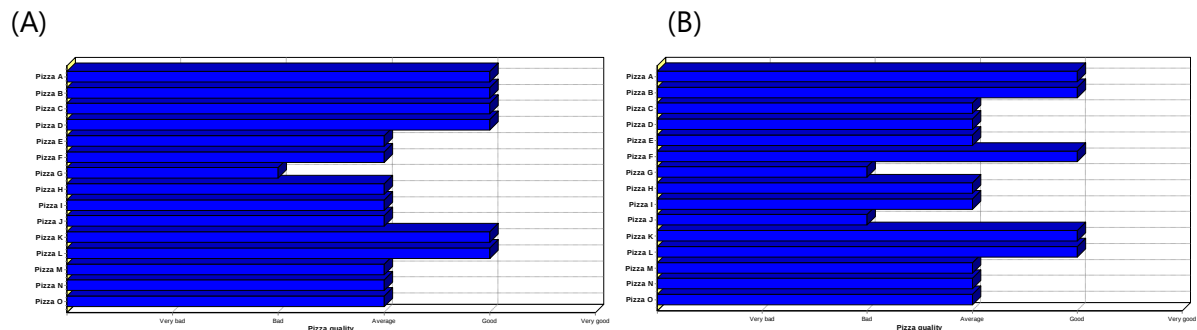


Figure 6. Pizzas quality assessed using the multicriteria model with different ponderations: (A) environment: 20%; nutrition: 40%; sensory: 40%; (B) environment: 10%; nutrition: 30%; sensory: 60%.

Figure 6 compared to Figure 4 shows that the modification of the weightings between the three criteria induce a modification of the results. It can therefore be said that the results are very sensitive to the weights used and that two users using different weights will produce different results. Moreover, it is interesting to note that the weights given by the participants place the environmental dimension well below the other two in terms of interest (only 10 and 20%). At these percentages, the contribution of the environmental dimension is low. In particular, the results obtained with a weighting of 10 for the environmental dimension are the same for 14 of the 15 pizzas studied as those obtained with a weighting of 0%. It can therefore be said that using too a low weight for an indicator can lead to it not appearing in the results at all.

4. Limits and perspectives

This study constitutes a first approach aiming at showing the possible use of multicriteria approaches in food product design in order to take into account several dimensions such as nutritional, environmental and sensory qualities. The results show that the developed model allows to discriminate products between them, to identify the best options and to find ways of improvement for existing pizzas. In order to go further, it would be interesting to complete the present study with a study focusing on evaluating the understanding of the model and its input and output variables by potential users. This study would also provide feedbacks on the model building and on the acceptability of the criteria and indicators taken into account by the professionals from the pizza industry and thus determine to what extent they would be inclined to use it.

It would also be interesting to see if it would be possible to develop this type of model for other food products. However, the development of such a tool requires a lot of data. Indeed,

to be able to carry out this type of approach for another food product, it will be necessary to first perform LCA, collect nutritional composition data and make sensory analysis on a large number of products in order to be able to calculate threshold values and thus parameterize the tool. Nevertheless, it is expected that due to the forthcoming environmental labeling, more and more companies will have to carry out LCA of their products and communicate on their environmental performance, which could make this step easier. Also, the compositions from one pizza to another tend to be very different in our sample. It would be interesting to implement the same approach for a family of pizzas, for example ham and cheese pizzas, to recalculate the threshold values accordingly and to see if the tool still allows to discriminate the products between them or not. Similarly, pizzas belong to a category with a wide variability between products. However, this is not the case for all food product categories on the market. It is therefore to be expected that products from categories with lower variability from one product to another will not be as well discriminated by this type of tool.

Finally, the weightings of the criteria and indicators are flexible so that the user can change them in order to make them reflect their own goals and issues. As presented in section 3.3.5., the participants gave quite low weightings to the environmental dimension compared to the nutritional and sensory ones. This highlights the fact that proposing design tools to help industrials including the environmental dimension in the design process of food products without this being to the detriment of other dimensions of interest (such as sensory and nutritional qualities) is not sufficient. Indeed, it is imperative that the availability of technical assistance (multi-criteria design assistance tool, simplified calculator of environmental impacts of products, etc.) is accompanied by an increase in the willingness of companies to better integrate the environmental dimension. To achieve this, various actions could be implemented. It would be interesting to conduct a study to determine whether offering this type of multicriteria model to food industry professionals would increase their consideration of environmental quality in food product design. If this is not the case, other actions could help to achieve this goal. The future environmental food labeling could be an interesting option to incite companies to design or re-design food products that are more environmentally friendly. Indeed, nutritional labeling has led many food companies to re-design their products from a nutritional point of view (Soler et al., 2020) and it is therefore possible that this will also be the case with environmental labeling. In any case, the environmental data currently available are not necessarily as numerous and robust as the nutritional data, which could be a limit to the implementation of such a display, the objective being of course to avoid to falsely favor or penalize a product.

5. Conclusion

This study has shown that the use of a multicriteria model could bring new elements to design decisions, and that it could be possible to integrate the environmental dimension into the design process without using LCA, that seem to be a limit for professionals of the food sector. First, semi-structured interviews with pizza industry professionals were performed to determine

the relevant quality criteria (other than environmental dimension) to take into account. The interviews answers, completed by the review of different documents (research article related to pizzas, French governmental nutritional recommendations, ...) were also used to identify indicators related to each criterion. The model was developed on the DEXi software. For the quantitative indicators, threshold values were defined using a large number of data from previous projects. The model was evaluated using 15 pizzas which led to different conclusions. Firstly, it was shown that the nutritional, environmental and sensory qualities were contradictory for most of the pizzas, thus highlighting the interest of using a multicriteria tool for pizza design. Then, it was shown that the tool allowed to discriminate the pizzas between them and to highlight the best trade-offs. The 5 pizzas with the highest global quality were the pizzas containing less cheese and more vegetables than the others and possibly containing ham (for two of them). On the other hand, the two pizzas with the lowest global quality were the richest pizza in cheeses and a pizza rich in fatty animal products such as cheese, cream and lardons. The tool also provides suggestions on how to improve the overall quality of a pizza. It has been shown that reformulating a poorly rated pizza by reducing its fatty animal products contents and increasing the vegetable and tomato sauce content can improve its nutritional and environmental qualities.

Thus, the use of this tool by companies can allow them to include the environmental dimension in their product design process in an easy, quick way, without any particular skill (no need to carry out an entire LCA for each product) while also controlling the nutritional and sensory dimensions that are important to them. It could also have an educational effect for the users. Indeed, several companies seem to consider eco-design of packaging as a key means to reduce the environmental impacts of a product, while the contribution of packaging to the overall environmental impacts of a food product is generally quite low, unlike ingredients. Integrating packaging into the tool in a way that poor packaging can lower the score obtained for ingredients but good packaging does not improve it can make users aware of these respective contributions and thus enable them to evolve their eco-design practices so that they have the most beneficial impacts possible.

However, the use of weights established by the participants shows that the weight attributed to environmental quality is often low compared to the weights allocated to the other two dimensions. The use of such weightings implies that the results obtained with the multicriteria tool would be similar to the results obtained if the environmental dimension had not been taken into account. This shows that the development of tools is not enough and that work aiming to improve the willingness of food companies to improve the environmental quality of their product is essential to achieve an effective reduction in the environmental impacts of food products.

References

- Alaphilippe, A., Angevin, F., Guérin, A., Guillermin, P., Velu, A., Zavagli, F., 2017. DEXIFruits, un outil d'évaluation multicritère des systèmes de production de fruits: d'un modèle de recherche à un outil terrain co-construit. *Innovations Agronomiques* 59, 205–212. <https://doi.org/10.15454/1.5138502185112727E12>
- ANSES, 2020. Ciqua, table de composition nutritionnelle des aliments [Online]. Available. <https://ciqua.anses.fr/> (Accessed on 9 August 2022).
- Augusto, P.E., 2020. Challenges, trends and opportunities in food processing. *Current Opinion in Food Science, Food Engineering & Processing* 35, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.005>
- Belton, V., Stewart, T., 2002. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Springer Science & Business Media.
- Bohanec, M., Žnidaršič, M., Rajkovic, V., Bratko, I., Zupan, B., 2013. DEX Methodology: Three Decades of Qualitative Multi-Attribute Modeling. *Informatica* 37, 49–54.
- Chantal, J., Hercberg, S., Europe, W.H.O.R.O. for, 2017. Development of a new front-of-pack nutrition label in France: the five-colour Nutri-Score. *Public health panorama* 03, 712–725.
- Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.G., Souchon, I., 2022a. Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market. *Journal of Cleaner Production* 336, 130128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130128>
- Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.-G., Souchon, I., 2022b. Life cycle inventory and assessment data for quantifying the environmental impacts of a wide range of food products belonging to the same food category: A case study of 80 pizzas representatives of the French retail market. *Data in Brief* 41, 107950. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107950>
- Craheix, D., Bergez, J.-E., Angevin, F., Bockstaller, C., Bohanec, M., Colomb, B., Doré, T., Fortino, G., Guichard, L., Pelzer, E., Méssean, A., Reau, R., Sadok, W., 2015. Guidelines to design models assessing agricultural sustainability, based upon feedbacks from the DEXi decision support system. *Agron. Sustain. Dev.* 35, 1431–1447. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0315-0>
- Desorge M., Lacroix A., Muller L., Pernin C., Potdevin C., Ruffieux B. (2017). L'étiquetage au service d'une alimentation durable : Le point de vue des consommateurs. Rapport d'étude. INRA-CLCV, 50 pages + annexes.
- Drake, J.I., de Hart, J.C.T., Monleón, C., Toro, W., Valentim, J., 2017. Utilization of multiple-criteria decision analysis (MCDA) to support healthcare decision-making FIFARMA, 2016. *J Mark Access Health Policy* 5, 1360545. <https://doi.org/10.1080/20016689.2017.1360545>
- Le Féon, S., Dubois, T., Jaeger, C., Wilfart, A., Akkal-Corfini, N., Bacenetti, J., Costantini, M., Aubin, J., 2021. DEXiAqua, a Model to Assess the Sustainability of Aquaculture Systems: Methodological Development and Application to a French Salmon Farm. *Sustainability* 13, 7779. <https://doi.org/10.3390/su13147779>
- Linnemann, A.R., Benner, M., Verkerk, R., van Boekel, M.A.J.S., 2006. Consumer-driven food product development. *Trends in Food Science & Technology, EFFoST Warsaw 2004* 17, 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.11.015>
- Lombardi Netto, A., Salomon, V.A.P., Ortiz-Barrios, M.A., Florek-Paszkowska, A.K., Petrillo, A., De Oliveira, O.J., 2021. Multiple criteria assessment of sustainability programs in the textile industry. *International Transactions in Operational Research* 28, 1550–1572. <https://doi.org/10.1111/itor.12871>
- Madoumier, M., Trystram, G., Sébastien, P., Collignan, A., 2019. Towards a holistic approach for multi-objective optimization of food processes: A critical review. *Trends in Food Science & Technology* 86, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.002>
- Masset, G., Soler, L.-G., Vieux, F., Darmon, N., 2014. Identifying Sustainable Foods: The Relationship between Environmental Impact, Nutritional Quality, and Prices of Foods Representative of the French Diet. *Journal of the*

Academy of Nutrition and Dietetics 114, 862–869. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2014.02.002>

Mendoza, G., Macoun, P., Prabhu, R., Sukardi, D., Purnomo, H., Hartanto, H., 1999. Guidelines for applying multi-criteria analysis to the assessment of criteria and indicators. Criteria and Indicators Toolbox Series No 9, CIFOR, Bogor, Indonesia 1–85.

Ministère des solidarités et de la santé, 2019. Programme national nutrition santé 2019-2023.

Pažek, K., Prišenk, J., Bukovski, S., Prevolšek, B., Rozman, Č., 2020. Multicriteria Assessment of the Quality of Waste Sorting Centers—A Case Study. Sustainability 12, 3780. <https://doi.org/10.3390/su12093780>

PIC International, 2020. La croissance retrouvée du marché de la pizza - News commerce - 701 [Online]. Available. <https://www.pic-inter.com/actualites-commerce/news-commerce/la-croissance-retrouvee-du-marche-de-la-pizza-701.html> (Accessed 9 February 2021).

Ruzante, J.M., Grieger, K., Woodward, K., Lambertini, E., Kowalczyk, B., 2017. The Use of Multi-criteria Decision Analysis in Food Safety Risk-benefit Assessment. Food Protection Trends 37, 132–139.

Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-É., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. Agron. Sustain. Dev. 28, 163–174. <https://doi.org/10.1051/agro:2007043>

Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., Doré, T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. Agron. Sustain. Dev. 29, 447–461. <https://doi.org/10.1051/agro/2009006>

Soler L.G., Van de Werf H.M.G., Muller L., Gascuel C., Colomb V., Rimbaud A., Mousset J., 2020. L’affichage environnemental des produits alimentaires: Quelles modalités, quelles données, quels usages? Document de travail.

United Nations, 2020. Sustainable development GOALS [Online]. Available. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/> (Accessed 28 July 2021).

Tukker A., Huppes G., Geerken T., Nielsen P., 2006. Environmental Impact of Products (EIPRO): Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25. Technical Report Series.

van Dooren, C., Douma, A., Aiking, H., Vellinga, P., 2017. Proposing a Novel Index Reflecting Both Climate Impact and Nutritional Impact of Food Products. Ecological Economics 131, 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.029>

Visschers, V.H.M., Siegrist, M., 2015. Does better for the environment mean less tasty? Offering more climate-friendly meals is good for the environment and customer satisfaction. Appetite 95, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.08.013>

Yilmaz, V.A., Koca, İ., 2020. Development of gluten-free corn bread enriched with anchovy flour using TOPSIS multi-criteria decision method. International Journal of Gastronomy and Food Science 22, 100281. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2020.100281>

6.3 CONCLUSION DU CHAPITRE 6

L'article 5 a permis de montrer que l'usage d'un modèle multicritère développé sur le logiciel DEXi semble être un moyen approprié de coupler différentes dimensions de qualité d'un produit alimentaire, dont sa qualité environnementale lors de la phase de conception. Cette preuve de concept montre en effet que les différentes pizzas testées sont bien discriminées par l'outil, permettant ainsi d'identifier les meilleurs compromis parmi plusieurs options mais également les voies d'améliorations possibles pour un produit donné, confirmant ainsi notre hypothèse de départ. Ainsi, l'usage de ce type de modèle en conception/reconception de produit semble pertinent. Cette étude a également montré qu'il était possible, tout du moins pour l'échantillon de pizzas étudié, d'identifier des indicateurs simples à l'origine des principales variations de performance environnementale entre des produits d'une même catégorie, à partir des performances environnementales d'un grand nombre de produits calculées par ACV. Bien que cette démarche nécessite un grand nombre de données et ne remplace pas une ACV classique, elle permet toutefois d'offrir aux entreprises une possibilité simple pour comparer les performances environnementales de différents produits d'une même catégorie, et ainsi de les prendre en compte plus facilement lors du processus de conception. La détermination d'indicateurs simplifiés semble ainsi être un moyen intéressant pour augmenter la prise en compte de la dimension environnementale en conception de produits alimentaires par les entreprises. Ceci peut également avoir un intérêt pédagogique en permettant aux entreprises d'identifier facilement les actions d'écoconception les plus efficaces possibles pour leurs produits.

CHAPITRE 7 : DISCUSSION GENERALE

Les différents travaux présentés au cours de ce manuscrit nous donnent des éléments de réponses à la problématique « Comment évaluer la qualité environnementale pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception de produits alimentaires ? ».

7.1. COMMENT EVALUER LA DIMENSION ENVIRONNEMENTALE DES PRODUITS ALIMENTAIRES DANS UNE OPTIQUE DE CONCEPTION/RECONCEPTION DE PRODUITS ?

Comme précédemment établi, l'ACV constitue aujourd'hui la méthode de référence pour l'évaluation des impacts environnementaux de produits, dont les produits alimentaires. Nos résultats (chapitre 2 et chapitre 3) ont mis en évidence que l'utilisation de l'ACV permettait de bien discriminer les performances environnementales des produits d'une même catégorie. Ces résultats confirment notre hypothèse initiale selon laquelle l'ACV est une méthode adéquate à l'évaluation de la dimension environnementale dans une optique de conception/reconception de produits alimentaires. Néanmoins, l'utilisation de l'ACV dans ce contexte se heurte à

plusieurs difficultés.

7.1.1. Manque de données d'ICV

Les résultats issus des chapitres 2 et 3 ont montré qu'il pouvait exister une grande variabilité d'impacts environnementaux entre des produits alimentaires d'une même catégorie. Les différences de recettes (par exemple la teneur en fromage d'une pizza), des pratiques des fabricants (par exemple la performance énergétique de la cave d'affinage utilisée) ou encore des pratiques des consommateurs (par exemple la durée d'utilisation du four) contribuent à cette variabilité. Ceci montre que les produits alimentaires d'une même catégorie ne doivent pas être considérés comme ayant les mêmes impacts environnementaux et aussi l'importance de pouvoir bien discriminer les produits d'une même catégorie entre eux. Une bonne discrimination est notamment nécessaire à la mise en évidence de leviers d'écoconception pertinents pour un produit donné. Néanmoins, le manque de données d'inventaire spécifiques à chaque produit peut rendre difficile la discrimination entre des produits d'une même catégorie. En effet, bien que la mise à disposition de la base de données AGRIBALYSE 3.0 en 2020 soit une avancée importante ayant permis l'accès à un certain nombre de données d'inventaire liées à des produits agricoles et alimentaires français, le manque de données spécifiques reste une limite importante si l'objectif est de concevoir ou de reconcevoir un produit plus respectueux de l'environnement car il est possible que les améliorations menées ne puissent pas être modélisées. En particulier, bien que les données d'inventaires agricoles se diversifient et offrent de plus en plus de possibilités pour modéliser le plus finement possible les impacts environnementaux des productions agricoles, les données d'inventaires en lien avec la transformation sont beaucoup moins variées et donc assez peu spécifiques à des cas particuliers. Afin de pouvoir bien discriminer les performances environnementales des produits alimentaires disponibles sur le marché français d'une part et de pouvoir mieux modéliser des actions d'écoconception de produits alimentaires d'autre part, il semble donc particulièrement important qu'un travail visant à explorer et quantifier les différentes pratiques des fabricants soit réalisé.

Cela est également le cas pour les données relatives à l'étape d'usage du produit alimentaire par le consommateur, comme cela a été montré dans le chapitre 3. En effet, cette étape est bien souvent sous-estimée ou absente des études ACV par manque de données alors que, comme cela a été montré dans le chapitre 3, cette étape peut avoir une influence non négligeable sur les résultats d'ACV. De plus, il faut garder à l'esprit qu'à cette étape, les actions réelles des consommateurs peuvent différer grandement des recommandations de préparation mentionnées sur l'emballage, ce qui peut influencer sur les résultats d'impacts environnementaux. Ainsi, l'utilisation de données estimées peut conduire à une surestimation ou une sous-estimation de la donnée réelle. Il y a donc un grand besoin de disposer de davantage de données d'inventaire mesurées directement au domicile des consommateurs. La collecte des données pourrait alors s'effectuer par l'intermédiaire de capteurs intégrés aux différents équipements utilisés par les consommateurs mettant en jeu des challenges techniques

importants.

En réponse à ce manque de données, on observe une montée de la science ouverte qui pourrait permettre d'améliorer l'accès à l'information pour les ACVistes. Néanmoins, les données d'ICV sont rarement mises à disposition. Un bon moyen de mutualiser les données d'inventaires est de les publier. Cette démarche pourrait permettre aux praticiens et utilisateurs d'ACV de générer des résultats plus représentatifs de la réalité et ainsi de faire évoluer plus rapidement l'état des connaissances. C'est pour cette raison que la plupart des articles présentés dans ce manuscrit sont associés à un data paper dans lequel l'ensemble des données d'inventaires ainsi que les résultats d'ACV sont mis à disposition. Néanmoins, la recherche publique manque bien souvent de données issues du terrain. Ainsi, si les industriels communiquaient davantage sur différents aspects relatifs au cycle de vie de leurs produits (équipements utilisés, consommation d'eau, d'électricité etc.), ceci permettrait la réalisation d'inventaires plus précis et bien plus riches. De ce fait, une implication des acteurs industriels de l'agroalimentaire semble indispensable à une évaluation plus réaliste de la performance environnementale des produits alimentaires. De même, la mise en place d'approches de sciences participatives permettant d'inclure les consommateurs aux études d'évaluation environnementale et de collecter ainsi des données témoignant de leurs pratiques semble importante.

7.1.2. Limites méthodologiques de l'ACV pour l'étude des impacts environnementaux des produits alimentaires

L'ACV se heurte à différentes limites méthodologiques quand elle est utilisée pour l'étude des produits alimentaires de manière générale. Une de ces limites à laquelle nous nous sommes intéressés durant cette thèse est la problématique liée à l'usage d'une UF massique.

En effet, l'unité fonctionnelle massique qui est la plus souvent utilisée en ACV de produits alimentaires n'est pas représentative de la fonction du produit comme cela devrait être le cas selon la norme ISO 14040. Ainsi, l'usage d'une UF massique encourage une production visant davantage à atteindre une certaine quantité plutôt qu'une certaine qualité de produit. Comme cela a été montré dans le chapitre 4, la prise en compte de la fonction du produit étudié peut être améliorée en incluant une dimension nutritionnelle au sein de l'UF. Il a également été montré que le choix de l'UF pouvait avoir d'importantes conséquences sur les résultats d'ACV. Ainsi, lorsque l'objectif est de comparer des produits entre eux, un produit peut apparaître comme le meilleur d'un point de vue environnemental lorsque l'ACV est réalisée avec une certaine UF et le moins bon lorsqu'une autre UF est utilisée. Il semble donc difficile de s'accorder sur une UF « parfaite ». Par exemple, le fait de baser l'UF sur un ou plusieurs nutriments limite la fonction du produit alimentaire à fournir ce ou ces nutriment(s), ce qui n'est pas forcément représentatif de la réalité. Une UF basée sur un nutriment spécifique peut toutefois s'avérer intéressante pour l'évaluation d'un produit à destination d'une population déficiente en un nutriment spécifique. Ainsi, le choix de l'UF doit se faire selon l'objectif de l'étude et le contexte de réalisation, comme le préconise la norme ISO 14044. Au vu de nos

résultats, nous pensons que dans un contexte de recherche exploratoire, l'option la plus adéquate consiste à confronter les résultats obtenus avec plusieurs UF afin d'obtenir une visualisation plus globale des impacts environnementaux d'un produit. Ceci semble d'autant plus important que, comme cela a été montré dans le chapitre 3, l'usage de différentes UF peut aboutir à des résultats d'ACV contradictoires. Néanmoins, cela semble difficile à mettre en place dans un contexte de conception/reconception de produits. En effet, les possibles résultats contradictoires ainsi que le fait que les indicateurs ACV peuvent être difficiles à manier pour les industriels font que l'utilisation d'ACV nutritionnelles ne semble pas adéquate. De plus, les résultats ainsi obtenus ne permettent pas d'identifier facilement les axes d'amélioration possibles, ce qui est indispensable dans une démarche d'écoconception. Il en est de même si l'objectif est de communiquer des résultats à la population, ce qui rend difficile le choix de l'UF dans ces contextes.

7.1.3. Difficulté des entreprises agroalimentaires à utiliser des indicateurs ACV

Au cours du chapitre 5, les résultats d'entretiens conduits auprès de différents professionnels du secteur agroalimentaire ont été présentés. Ces derniers ont révélé que les indicateurs ACV ne semblaient pas être les indicateurs retenus pour l'étude de la performance environnementale au sein des entreprises agroalimentaires. En effet, les indicateurs mentionnés par ces professionnels en lien avec la dimension environnementale sont plus de l'ordre des données d'inventaires que de l'ordre des impacts environnementaux. Les plus fréquemment mentionnés sont par exemple relatifs aux consommations d'eau ou d'électricité à l'échelle du site de production, à la valorisation des déchets ou encore à la réduction des emballages. Les raisons évoquées par certains vis-à-vis de leur non utilisation de l'ACV étaient liées à un coût trop important ainsi qu'un manque de fiabilité dans les données d'inventaire et donc dans les résultats d'ACV. Une des conséquences de cette réticence à utiliser le cadre ACV par certaines entreprises est que, lorsqu'une action visant à réduire les impacts environnementaux est mise en place, l'efficacité de cette action en termes de réduction d'impacts n'est pas forcément vérifiée. Ceci met en relief que, bien que l'ACV soit à ce jour la méthode de référence pour l'étude de la performance environnementale des produits, elle ne semble, pour l'heure, pas forcément bien adaptée aux contraintes des professionnels de l'agroalimentaire. Cela met également en évidence la nécessité d'établir un cadre réglementaire plus défini afin de permettre aux entreprises de communiquer sur des améliorations réelles et d'éviter le « greenwashing » auprès des consommateurs. Du fait du futur affichage environnemental, il est à prévoir que l'intérêt pour la dimension environnementale ainsi que pour les méthodes permettant de prendre en compte cette dimension soit amené à fortement évoluer. Le développement d'outils d'évaluation environnementale simplifiés pourrait permettre aux entreprises de prendre en compte cette dimension plus simplement. Quoiqu'il en soit, à l'issue des entretiens présentés dans le chapitre 5, il semble clair que, pour que la dimension environnementale soit intégrée au processus de conception/reconception de produit au sein des entreprises agroalimentaires, l'utilisation des

indicateurs ACV n'est pas adéquate et que des indicateurs simplifiés doivent être proposés aux entreprises.

7.2. QUELLES SONT LES PRINCIPALES DIMENSIONS DE QUALITE DES PRODUITS ALIMENTAIRES ET COMMENT SE SITUE LA QUALITE ENVIRONNEMENTALE PAR RAPPORT A CES DIMENSIONS ?

Les résultats des entretiens conduits auprès de professionnels du secteur agroalimentaire, présentés dans le chapitre 5, laissent à penser que l'intérêt de ces professionnels vis-à-vis de la dimension environnementale est actuellement limité.

Il a ainsi été montré que la dimension environnementale n'était globalement pas perçue comme une dimension de la qualité d'un produit alimentaire. Ceci peut s'expliquer par le fait que les actions environnementales menées par les entreprises, lorsqu'elles existent, se focalisent principalement à l'échelle du site et non à l'échelle du produit. Les actions menées à l'échelle du produit alimentaire consistent principalement à l'écoconception des emballages. Ceci peut être expliqué par le fait qu'il existe une réglementation spécifique aux emballages (notamment la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire qui a pour objectif d'arrêter des emballages plastiques à usage unique d'ici 2040 (Ministère de la transition écologique, 2022a)). Néanmoins, comme de nombreuses études l'ont mis en évidence, les ingrédients contribuent bien souvent majoritairement aux impacts environnementaux finaux d'un produit alimentaire et il est donc étonnant que la dimension environnementale ne soit pas plus présente au niveau de la formulation des produits. De manière générale, les freins à la prise en compte de la dimension environnementale évoqués par certains participants sont le manque de compétence en interne, le manque de moyen financier et le manque de temps.

Les dimensions de qualité étant globalement les plus fréquemment mentionnées par les professionnels interrogés pour les produits alimentaires étudiés dans le chapitre 5 (pizzas, fromages, sauces tomate) sont : la qualité sensorielle, la qualité nutritionnelle, la qualité fonctionnelle, la qualité sanitaire et la qualité économique. L'intérêt pour ces dimensions semble varier selon le produit étudié. Par exemple, pour les pizzas et les fromages qui sont des produits dits « plaisir », la dimension sensorielle est perçue comme étant particulièrement importante tandis que pour la sauce tomate, la qualité fonctionnelle semble être la plus importante. Quoi qu'il en soit, les résultats présentés dans le chapitre 5 ont été obtenus sur un petit nombre de participants travaillant dans des domaines spécifiques (pizzas, fromages, sauces tomate et bactéries lactiques). De ce fait, les tendances observées devront être confirmées sur un plus grand nombre de participants notamment afin de mettre en évidence si des différences significatives peuvent être observées en fonction du secteur d'activité ou encore de la taille de l'entreprise.

Quoi qu'il en soit, la dimension environnementale n'étant pas prioritaire pour les entreprises agroalimentaires interrogées, sa prise en compte ne peut pas se faire au détriment d'autres

dimensions de qualité perçues comme plus importantes par les professionnels du secteur.

7.3. COMMENT COUPLER LA QUALITE ENVIRONNEMENTALE ET LES AUTRES DIMENSIONS DANS LA CONCEPTION DES PRODUITS ALIMENTAIRES

Comme cela a été montré au cours du manuscrit (notamment dans les chapitres 2, 3 et 4), les dimensions environnementale et nutritionnelle, de même que les dimension environnementale et sensorielle peuvent parfois être contradictoires au sein d'une même catégorie de produits alimentaires. Par exemple, il a été montré dans le chapitre 2 que les pizzas et les fromages ayant le plus d'impacts environnementaux avaient tendance à être également les plus riches en acides gras saturés, qui sont des nutriments considérés comme à limiter dans les scores nutritionnels tels que le Nutri-Score ou le SAIN/LIM, mais également les plus riches en protéines, nutriment à favoriser. De même, il a été montré dans le chapitre 3 que les pizzas les plus appréciées d'un point de vue sensoriel par les consommateurs étaient globalement les pizzas faites maisons. Or, d'après les résultats d'ACV, ces dernières ne sont pas globalement meilleures d'un point de vue environnemental que les pizzas industrielles, et ont même tendance à avoir plus d'impacts sur les indicateurs sensibles à l'électricité. Ceci montre qu'une bonne performance environnementale n'est pas forcément liée à une bonne performance nutritionnelle ou sensorielle au sein d'une catégorie de produits. Cette absence de corrélation positive peut rendre difficile la conception/reconception de produits plus respectueux de l'environnement tout en conservant une certaine qualité nutritionnelle et sensorielle. Il y a donc un intérêt à coupler ces dimensions pour pouvoir faire des choix objectifs constituant les meilleurs compromis entre différentes dimensions.

Néanmoins, comme présenté dans le chapitre 1, les différentes dimensions de qualité d'un produit alimentaire sont évaluées selon des indicateurs pouvant être de nature très différentes (qualitatives, quantitatives, unités variées, faisant intervenir ou non les consommateurs, ...), pouvant rendre leur évaluation conjointe difficile.

L'usage d'UF nutritionnelle permet de coupler la dimension environnementale à la dimension nutritionnelle (cf. chapitre 4) mais son application à des cas de conception de produits semble limitée, notamment pour les raisons suivantes : la qualité nutritionnelle ne peut pas être intégralement représentée au sein de l'UF, plusieurs dimensions ne peuvent pas facilement être intégrées au sein de l'UF, les résultats obtenus peuvent être difficiles à interpréter (particulièrement si l'objectif est d'identifier de possibles voies d'améliorations), et les entreprises agroalimentaires ne sont pas forcément à l'aise avec l'utilisation d'indicateurs ACV.

Les résultats présentés au sein du chapitre 6 laissent à penser que l'utilisation d'outils d'aide à la décision multicritère pourrait constituer une aide pertinente aux concepteurs de produits alimentaires souhaitant intégrer différentes dimensions de qualité dont la qualité environnementale. Notamment, les modèles développés sur le logiciel DEXi permettent de pouvoir utiliser des critères de nature très différentes (qualitatifs, quantitatifs, échelles différentes, ...), ce qui semble indispensable étant donné la variété des dimensions de qualité

prises en compte lors de la conception d'un produit alimentaire. Il faut cependant noter que l'inclusion de la dimension environnementale dans ce type d'outils doit se faire de manière à ce que les indicateurs utilisés soient faciles à manipuler par les utilisateurs. En effet, comme cela a été discuté lors du chapitre 5, les indicateurs utilisés par les entreprises interrogées pour améliorer la qualité environnementale de leurs produits sont en général simples et différents des indicateurs ACV. Il est donc à prévoir que l'intégration des indicateurs ACV au sein d'un outil multicritère ne facilitera pas la prise en compte de la dimension environnementale en conception de produits alimentaires. L'approche proposée pour y parvenir dans le chapitre 6, consiste à identifier les principaux facteurs à l'origine de la variabilité des impacts environnementaux entre de nombreux produits d'une même catégorie et à les utiliser comme indicateurs. Les indicateurs identifiés peuvent toutefois être complétés par des indicateurs importants aux yeux des industriels, comme des indicateurs en lien avec les emballages par exemple. Cette démarche semble une approche intéressante pour répondre à la problématique de thèse. Elle nécessite cependant de nombreuses données, ce qui peut être un frein à son application sur d'autres catégories de produits.

Ce besoin de nombreuses données est aussi vrai pour les autres dimensions incluses dans l'outil. Ces données sont notamment nécessaires pour déterminer les valeurs seuils dans le cas des indicateurs quantitatifs. Pour les grandes entreprises, on peut imaginer que les valeurs seuil pourraient être calculées à partir de leur gamme de produits mais pour les petites entreprises n'ayant pas de large gamme de produits, cela reste limité. Il faudrait alors que des données relatives aux impacts environnementaux de nombreux produits d'une même catégorie soient calculées et rendues publiques pour que les entreprises puissent déterminer des valeurs seuils et ainsi situer leurs produits par rapport aux autres de cette gamme disponibles sur le marché.

Quoiqu'il en soit, l'utilisation de ce type d'outil semble plus pertinente pour certaines catégories de produits que pour d'autres. En effet, tous les produits alimentaires ne sont pas égaux face aux leviers de reformulation. Par exemple, comme cela a été évoqué dans le Chapitre 2, la présence du label AOP limite fortement l'évolution des pratiques pouvant être à l'origine d'une réduction significative des impacts environnementaux en lien notamment avec la quantité et le type de lait utilisé ou encore la durée d'affinage. Il en est de même concernant les leviers de reformulations nutritionnelles qui peuvent être plus ou moins nombreux selon les produits alimentaires. En effet, dans le rapport d'appui scientifique et technique rédigé par l'ANSES dans le but d'établir des seuils de reformulation de produits alimentaires en accord avec les objectifs du PNNS, ces derniers expliquent que plusieurs familles de fromages ont été exclues de certains axes de reformulation. Ainsi, les 40 familles du secteur des fromages ont été écartées de l'étude visant à réduire les sucres puisque ces derniers ne contiennent aucun sucres ajoutés à ceux déjà présents dans le lait, qui ne sont pas considérés comme des sucres à limiter selon l'ANSES. De même, 35 familles du secteur des fromages ont été écartées du projet de réduction des acides gras saturés car ces derniers proviennent du lait qui est le principal ingrédient. De plus, les actions sont particulièrement limitées pour les fromages bénéficiant de label de qualité. Les fromages n'ayant pas été écartés sont les fromages pouvant contenir des matières grasses ne provenant pas du lait, comme par exemple les fromages

fondus (ANSES, 2021). Inversement, si l'on reprend l'exemple des pizzas, on voit bien que les leviers de reformulation, aussi bien d'un point de vue environnemental que nutritionnel, sont beaucoup plus vastes. De manière générale, il semble que les produits complexes (faisant intervenir beaucoup d'ingrédients différents) tels que les pizzas aient davantage de leviers de reformulation que les produits plus simples, tels que les fromages. Ceci est d'autant plus vrai si le produit ne bénéficie pas d'un certain label ou d'une dénomination réglementée. Par exemple, pour bénéficier de l'appellation « compote », la teneur minimale réglementaire en sucres brix est de 24, ce qui signifie qu'un produit contenant moins de sucre ne pourra pas s'appeler « compote » (il devra porter un autre nom selon sa composition, tel que « purée de pomme » par exemple). Ceci met en relief les limites du champ d'action du secteur de l'industrie alimentaire. En effet, d'une part, certains produits ne peuvent pas (ou peu) être reformulés pour réduire leurs impacts environnementaux et d'autre part, même les produits pouvant être reformulés présentent également des limites. Par exemple, un plat contenant de la viande n'aura jamais une excellente qualité environnementale et un plat très riche en gras par nature n'aura jamais une excellente qualité nutritionnelle malgré la reformulation. L'usage d'un outil multicritère d'aide à la conception semble ainsi être plus intéressant dans le cas d'un produit complexe présentant de vastes leviers de re-conception (ex : pizza) que dans le cas d'un produit issu de la transformation d'un ingrédient principal et étant labélisé (ex : fromage AOP).

On peut toutefois s'interroger sur les limites de la reformulation. En effet, même en l'absence de label ou de terminologie réglementée, jusqu'à quel niveau peut-on reformuler un produit pour que le consommateur le considère toujours comme tel ? Par exemple une pizza sans bœuf ni fromage et avec une pâte faite de choux-fleurs sera sûrement mieux notée d'un point de vue environnemental et nutritionnel qu'une pizza 4 fromages, mais, sera-t-elle vraiment considérée comme une pizza par le consommateur ? En plus de l'acceptation des consommateurs et des possibles limites législatives évoquées, Van Raaij et al. (2009) pointent également les challenges soulevés par la reformulation en termes de sécurité et de technologie. Par exemple, la reformulation d'un produit en vue de réduire ses teneurs en sel peut entraîner une réduction de sa durée de vie, le sel ayant un effet conservateur. Également, d'un point de vue technologique, la reformulation peut entraîner une modification de la structure du produit, ce qui peut nécessiter des ajustements, comme par exemple au niveau du packaging (Van Raaij et al., 2009). Ceci montre que de nombreuses dimensions pourraient être pertinentes à prendre en compte au sein de l'outil multicritère, afin de ne pas passer à côté de certains aspects négatifs pouvant être associés à la reconception d'un produit. L'outil présenté dans le chapitre 6 ne prend en compte que trois dimensions, constituant ainsi une base pouvant être complétée par d'autres dimensions d'intérêt.

7.4. LIMITES A TRAVAILLER A L'ECHELLE DU PRODUIT ALIMENTAIRE

7.4.1. Echelle produit vs échelle site de production

La qualité environnementale n'est pas forcément perçue comme une dimension de qualité d'un produit alimentaire par les entreprises agroalimentaires. Ainsi, les actions à visées environnementales menées par les entreprises sont principalement à l'échelle du site de production (ainsi qu'au niveau des emballages). Or, ces actions, bien qu'importantes ne correspondent pas forcément aux leviers d'écoconception permettant de réduire le plus les impacts environnementaux à l'échelle du produit final. Il y a donc un besoin pour ces entreprises de mieux prendre en compte la dimension environnementale au niveau de la conception du produit, notamment parce que le choix et les proportions d'ingrédients jouent un rôle majeur dans les impacts environnementaux globaux. Cette meilleure prise en compte de la qualité environnementale à l'échelle du produit ne doit pour autant pas réduire les efforts menés à l'échelle du site, les deux approches étant complémentaires. En effet, bien que l'impact du site de production sur les impacts environnementaux d'un produit puissent être faibles pour certains produits, les impacts environnementaux liés au site de production peuvent être très importants si on se place à une échelle plus grande. Les actions visant à réduire les impacts environnementaux à l'échelle du site de production et à l'échelle du produit devraient être menées en parallèle afin de permettre une réduction des impacts environnementaux plus globale.

7.4.2. Echelle produit vs échelle régime alimentaire

Afin de répondre à la problématique de la thèse « comment évaluer la qualité environnementale pour l'intégrer aux autres dimensions de la qualité dans la conception de produits alimentaires ? », l'ensemble des travaux présentés dans ce manuscrit ont été conduits à l'échelle du produit. Les travaux menés ont mis en évidence l'intérêt d'écoconcevoir à l'échelle d'un produit et ont permis de proposer des techniques pour mieux inclure la dimension environnementale lors de la conception/reconception d'un produit. Néanmoins, l'utilisation de l'échelle « produit » présente plusieurs limites.

La première limite est que les stratégies d'écoconception seules ne sont pas suffisantes. En effet, la réduction des impacts environnementaux liés à notre alimentation passe par une amélioration de la performance environnementale de nos régimes alimentaires. Cette amélioration peut se faire de deux manières principales. La première consiste en une évolution des choix alimentaires inter-catégories (par exemple une diminution de la consommation de viande rouge au profit d'une augmentation de la consommation de produits végétaux) et des choix intra-catégorie (par exemple substituer une pizza particulièrement néfaste sur l'environnement par une pizza moins néfaste). C'est d'ailleurs pour cela que l'affichage environnemental prévoit de répondre à un objectif double : d'une part, permettre au consommateur de comparer les performances environnementales inter-catégories et d'autre part de lui permettre d'identifier les produits ayant la meilleure performance au sein d'une

même catégorie (Gouvernement français, 2022). Les stratégies d'écoconception permettent une amélioration des régimes alimentaires en proposant aux consommateurs des produits moins néfastes pour l'environnement au sein d'une même catégorie. Ces stratégies doivent toutefois s'accompagner de stratégies visant à faire évoluer les choix alimentaires inter-catégorie des consommateurs.

Une autre limite à travailler à l'échelle du produit alimentaire est qu'elle ne permet pas d'identifier les aliments responsables du plus d'impacts à l'échelle du régime alimentaire. Ainsi, un produit A peut générer de forts impacts environnementaux à l'échelle du produit mais de faibles impacts à l'échelle du régime alimentaire s'il est consommé en petite quantité. Ainsi, Vieux et al. (2013) ont étudié les émissions de gaz à effet de serre associées aux régimes alimentaires des français et ont conclu à une forte variabilité au sein de la population, liée en grande partie à la quantité d'aliments totale consommée par chaque consommateur. Ceci montre la limite de se focaliser à l'échelle du produit alimentaire.

L'utilisation d'une UF basée sur la portion, comme cela a été fait dans le chapitre 4 pourrait permettre de mieux adresser cette problématique. Il serait toutefois utile de travailler également sur les portions effectivement consommées et pas uniquement sur les portions recommandées car ces dernières peuvent être très différentes.

Ceci met également en relief une limite à la reconception des produits alimentaires par le biais de la reformulation. En effet, en modifiant la recette d'un produit, on modifie également ses caractéristiques, dont par exemple son indice de satiété. De ce fait, il faudrait s'assurer que la reformulation d'un produit alimentaire par le remaniement de sa recette n'entraîne pas une consommation plus importante de ce produit. Si tel est le cas, il faudrait alors voir si l'effet environnemental bénéfique de la reformulation observée à l'échelle du produit est maintenu à l'échelle du régime alimentaire malgré une augmentation de la masse de produit consommée. Ainsi, il semble que des études portant sur l'usage effectif des produits éco-conçus seraient importantes afin de pouvoir confirmer ou non l'avantage environnemental à une échelle plus grande que celle du produit. Un indicateur reflétant la quantité de produit effectivement consommée par le consommateur pourrait être intéressant à intégrer au sein de l'outil multicritère d'aide à la décision, afin d'éviter ce biais.

CONCLUSION

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont mis en évidence que la conduite d'actions d'écoconception à l'échelle du produit alimentaire, et pas uniquement à l'échelle de la catégorie de produit, étaient importantes. En effet, la variabilité des impacts environnementaux intra-catégorie est suffisamment importante pour permettre des actions d'écoconception efficaces. Néanmoins, la dimension environnementale ne semble pas souvent incluse dans le processus de conception de produit par les entreprises agroalimentaires interrogées, à

l'exception de l'attention portée aux emballages et à l'origine des ingrédients pour certaines. Afin d'aider les entreprises à identifier les voies d'amélioration les plus efficaces de la qualité environnementale de leurs produits, des outils d'aide à la conception pourraient leur être adressés. Néanmoins, la qualité des produits alimentaires a de multiples facettes (apporter des nutriments essentiels, donner du plaisir sensoriel, etc.) et l'amélioration de la performance environnementale ne doit pas se faire au détriment des autres dimensions de qualité. Ceci est d'autant plus vrai que la performance environnementale n'apparaît pas comme une priorité pour les entreprises interrogées. Parmi les dimensions d'intérêt pour les professionnels de l'agroalimentaire travaillant dans le secteur des pizzas et des fromages, la qualité sensorielle ainsi que la qualité nutritionnelle semblent être les plus importantes, bien que cela ne soit pas forcément le cas pour d'autres modèles d'étude tels que les sauces tomate ou encore les bactéries lactiques, probablement car ces derniers sont plutôt des « ingrédients » que des produits finis.

Or, les performances environnementales ne sont pas forcément positivement corrélées avec les dimensions nutritionnelles et sensorielles au sein d'une même catégorie de produits.

Cette absence de corrélation positive rend plus difficile la prise en compte de la dimension environnementale sans que cela ne soit au détriment des dimensions nutritionnelle et sensorielle. De ce fait, des méthodes doivent être proposées pour permettre de coupler ces différentes dimensions de qualité afin de pouvoir identifier les meilleurs compromis au sein d'une catégorie de produits alimentaires.

Une possibilité de couplage explorée pendant la thèse est l'inclusion de la dimension nutritionnelle au sein de l'UF lors de la réalisation des ACV. Cette méthode permet d'améliorer le classement des produits présentant un avantage nutritionnel par rapport au classement obtenu en utilisant une UF massique. De plus, ceci permet de répondre à une limite méthodologique. En effet, utiliser la dimension nutritionnelle comme UF permet de mieux représenter la fonction de l'aliment, ce que l'UF est censée représenter d'après la norme ISO 14040 (ISO, 2006b). Malgré cela, cette méthode présente plusieurs limites dont la difficulté d'inclure plusieurs dimensions à la fois et également la difficulté de travailler avec des dimensions qualitatives. De plus, les indicateurs ACV ne sont pas utilisés fréquemment par les entreprises agroalimentaires (tout du moins pour les entreprises interrogées), et il semble donc important de proposer des indicateurs plus faciles à utiliser et à interpréter.

Afin d'évaluer simultanément la performance d'un produit alimentaire selon différentes dimensions potentiellement contradictoires, l'usage d'un modèle d'aide à la décision multicritère peut s'avérer pertinent. Ce type de modèle permet en effet de gérer des critères contradictoires et aide ainsi à prendre des décisions objectives en fonction de différentes règles de décision définies au préalable. L'utilisation d'un modèle DEXi semble particulièrement adaptée aux dimensions de la qualité d'un produit alimentaire qui peuvent être de natures très différentes. Le modèle DEXi présenté dans le chapitre 6 permet d'identifier les pizzas constituant les meilleurs compromis entre qualité environnementale, nutritionnelle et sensorielle. Il permet également, pour une pizza donnée, d'identifier facilement la contribution

de chacun des critères considérés et ainsi de déterminer des voies d'amélioration possibles. Bien que ce modèle soit une première approche, les résultats obtenus peuvent laisser penser que ce type d'outil constitue un bon moyen d'intégrer la dimension environnementale aux autres dimensions de la qualité de produits alimentaires lors de la phase de conception. Néanmoins, afin de pouvoir être intégrée dans ce type d'outil, il semble nécessaire que la performance environnementale des produits alimentaires soit traduite sous forme d'indicateurs simples, plus facilement utilisables par les entreprises que les indicateurs ACV. En effet, il est à prévoir que l'outil ne sera pas utilisé s'il implique l'utilisation d'indicateurs ACV auxquels les entreprises agroalimentaires (particulièrement celles de petite taille) semblent peu sensibles. Une possibilité utilisée dans le chapitre 6 pour répondre à cette difficulté consiste à formuler des indicateurs simplifiés, identifiés comme à l'origine des principales variations d'impacts environnementaux entre des produits alimentaires d'une même catégorie. Pour ce faire, les impacts environnementaux d'un grand nombre de produits d'une même catégorie (ici 65 pizzas) ont été calculés par ACV. Puis, nous avons utilisé le single score (score ACV agrégé) de ces 65 pizzas pour les classer en 3 groupes selon leur performance environnementale. Les caractéristiques des pizzas de ces 3 groupes ont alors été étudiées afin de déterminer les principaux facteurs à l'origine des variations de performances environnementales des produits. Dans le cas présenté dans le chapitre 6, les teneurs en certains ingrédients (notamment certains produits animaux) étaient à l'origine des principales différences de performances environnementales observées entre les trois groupes. Des indicateurs basés sur les ingrédients ainsi identifiés ont ensuite été formulés afin de permettre aux utilisateurs d'estimer simplement à quel groupe de performance environnementale leur produit est susceptible d'appartenir.

Des travaux visant à développer ce type d'outils pour d'autres catégories de produits alimentaires et prenant en compte d'autres dimensions de qualité semblent d'intérêt. Néanmoins, leur utilisation implique que les professionnels du secteur agroalimentaire soient enclins à inclure la dimension environnementale dans leurs considérations au moment de concevoir ou de reconcevoir un produit. Or, ceci n'est pas forcément le cas comme le montrent les pondérations proposées par deux professionnels du secteur des pizzas pour la dimension environnementale (de 10 à 20%) au sein de l'outil. Ceci montre que l'avancée des outils permettant d'aider les entreprises agroalimentaires à proposer des produits plus respectueux de l'environnement tout en conservant une bonne qualité nutritionnelle et sensorielle doit se faire en parallèle d'une évolution des mentalités vis-à-vis de la qualité environnementale des produits alimentaires.

De plus, il serait intéressant de poursuivre les travaux conduits durant cette thèse notamment en faisant tester le prototype d'outil multicritère proposé dans le chapitre 6 à des industriels en conditions réelles. Ceci permettrait notamment d'évaluer l'appropriation des indicateurs par les professionnels ainsi que les axes d'améliorations sur lesquels travailler afin d'aboutir à un outil opérationnel. Il serait également intéressant d'étudier dans quelle mesure ce type d'outil pourrait être généralisé à d'autres catégories de produits ou encore si l'application de démarches similaires pourrait être envisagée à d'autres échelles, comme par exemple à l'échelle du repas ou même du régime alimentaire.

REFERENCES

- ADEME, 2017. Comment promouvoir l'éco-conception auprès des filières agricoles et agro-alimentaires ? Rapport de Synthèse. Angers, ADEME.
- ADEME, 2021. L'affichage environnemental [en ligne]. Disponible sur : <https://experts.ademe.fr/economie-circulaire/consommer-autrement/passer-a-l'action/reconnaitre-produit-plus-respectueux-lenvironnement/dossier/laffichage-environnemental/affichage-environnemental-contexte-objectifs#:~:text=Du%20Grenelle%20de%20l%27environnement%20C3%A0%20la%20loi%20Economie%20Circulaire&text=Ainsi%20cadr%C3%A9%20l%27affichage%20environnemental,d%27une%20base%20technique%20valid%C3%A9e> (consulté le 21 août 2022).
- ADEME, 2022. Eco-score : Fonctionnement général [en ligne]. Disponible sur : <https://docs.score-environnemental.com/methodologie/fonctionnement-general> [consulté le 15 août 2022].
- AFNOR, 2018. FAQ sécurité des aliments [en ligne]. Disponible sur : <https://www.afnor.org/agroalimentaire/faq/#:~:text=L%27ISO%2022000%20est%20la,des%20produits%20finis%20et%20s%C3%BBs> (consulté le 2 juillet 2022).
- Agreste, 2020. La production de déchets non dangereux dans les industries agroalimentaires [en ligne]. Disponible sur : <https://www.agreste.agriculture.gouv.fr/agresteweb/disaron/Pri2002/detail/#:~:text=En%202016%2C%2049%20%25%20des%20C3%A9tablissements,une%20proportion%20comparable%20C3%A0%202012> (consulté le 17 mai 2022).
- AGRIBALYSE, 2021. *Documentation AGRIBALYSE* [en ligne]. Disponible sur : <https://doc.agribalyse.fr/documentation/methodologie-acv> (consulté le 8 août 2022).
- Agroscope, 2012. Roue des arômes des fromages à pâte dure et mi-dure [en ligne]. Disponible sur : <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/fr/home/themes/denrees-alimentaires/analyse-sensorielle/milchprodukte--kaese/aromarad-kaese-und-milchprodukte.html> (consulté le 17 août 2022).
- Alaphilippe, A., Angevin, F., Guérin, A., Guillermin, P., Velu, A., Zavagli, F., 2017. DEXIFruits, un outil d'évaluation multicritère des systèmes de production de fruits : d'un modèle de recherche à un outil terrain co-construit. *Innovations Agronomiques* 59, 205–212.
<https://doi.org/10.15454/1.5138502185112727E12>
- ANIA, 2015. Livre vert des entreprises agroalimentaires de France [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ania.net/espace-pro/developpement-durable/bonnes-pratiques> (consulté le 14 novembre 2021).
- ANSES, 2013. Le Paquet hygiène [en ligne]. Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/le-paquet-hygi%C3%A8ne> (consulté le 28 août 2022).
- ANSES, 2014. Dangers physiques dans les aliments : corps étrangers [en ligne]. Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/system/files/GBPH2013sa0170.pdf> (consulté le 12 juillet 2022).
- ANSES, 2016. Actualisation des repères du PNNS : Elaboration des références nutritionnelles. Maisons-Alfort, ANSES.

- ANSES, 2017. La table de composition nutritionnelle du Ciquel [en ligne]. Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/la-table-de-composition-nutritionnelle-du-ciquel> (consulté le 15 aout 2022).
- ANSES, 2021. Simulation de seuils de reformulation par famille d'aliments transformés et impact sur les apports en sucres, acides gras saturés, sel et fibres de la population française. Rapport d'appui scientifique et technique [en ligne]. Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/system/files/UOA2019SA0122Ra.pdf> (consulté le 17 mai 2022).
- Appert, N., 1813. L'art de conserver pendant plusieurs années toutes les substances animales et végétales. 2ème édition. Paris, PATRIS et Cie.
- Augusto, P.E., 2020. Challenges, trends and opportunities in food processing. *Curr. Opin. Food Sci., Food Engineering & Processing* 35, 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.03.005>
- Barbier, C., Couturier, C., Pourouchottamin, P., Cayla, J.M., Sylvestre, M., Pharabod, I., 2019. Empreinte énergétique et carbone de l'alimentation en France / De la production à la consommation. Club Ingénierie Prospective Energie et Environnement. Paris, IDDRI.
- Bazzani, C., Canavari, M., 2017. Is Local a Matter of Food Miles or Food Traditions? *Ital. J. Food Sci.* 29, 505–517.
- Berardy, A., Johnston, C.S., Plukis, A., Vizcaino, M., Wharton, C., 2019. Integrating Protein Quality and Quantity with Environmental Impacts in Life Cycle Assessment. *Sustainability* 11, 2747. <https://doi.org/10.3390/su11102747>
- Bertoluci, G., Leroy, Y., Olsson, A., 2014. Exploring the environmental impacts of olive packaging solutions for the European food market. *J. Clean. Prod.* 64, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.09.029>
- Bianchi, M., Strid, A., Winkvist, A., Lindroos, A.-K., Sonesson, U., Hallström, E., 2020. Systematic Evaluation of Nutrition Indicators for Use within Food LCA Studies. *Sustainability* 12, 8992. <https://doi.org/10.3390/su12218992>
- Bigliardi, B., Filippelli, S., 2022. A review of the literature on innovation in the agrofood industry: sustainability, smartness and health. *EJIM* 25, 589–611. <https://doi.org/10.1108/EJIM-05-2021-0258>
- Birlouez, 2019. L'évolution de la perception de la qualité alimentaire au cours des âges. *INRA Prod. Anim.*, 32, 25-36.
- Bohanec, M., Žnidaršič, M., Rajkovič, V., Bratko, I., Zupan, B., 2013. DEX methodology: three decades of qualitative multi-attribute modeling. *Informatica* 37.
- Brezet, H. and van Hemel, C., 1997. A Promising Approach to Sustainable Production and Consumption. Paris, UNEP.
- Bruin, S., Jongen, Th.R.G., 2006. Food Process Engineering: The Last 25 Years and Challenges Ahead. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* 2, 42–81. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2003.tb00015.x>
- Burgess, A. Glasauer, P. 2004. Family Nutrition Guide. Rome, FAO.
- BVA, 2018. Les français et l'alimentation [en ligne]. Disponible sur : <https://www.bva-group.com/sondages/francais-alimentation/> (consulté le 8 décembre 2021).

- Carrillo-Labelle, R., Fort, F., Parras-Rosa, M., 2020. Motives, Barriers, and Expected Benefits of ISO 14001 in the Agri-Food Sector. *Sustainability* 12, 1724. <https://doi.org/10.3390/su12051724>
- Chaltiel, D., Adjibade, M., Deschamps, V., Touvier, M., Hercberg, S., Julia, C., Kesse-Guyot, E., 2019. Programme National Nutrition Santé – guidelines score 2 (PNNS-GS2): development and validation of a diet quality score reflecting the 2017 French dietary guidelines. *British Journal of Nutrition* 122, 331–342. <https://doi.org/10.1017/S0007114519001181>
- Chambers, L., McCrickerd, K., Yeomans, M., 2015. Optimising foods for satiety. *Trends in Food Science & Technology*, 41, 149-160. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2014.10.007>
- Chantal, J., Hercberg, S., Europe, W.H.O.R.O. for, 2017. Development of a new front-of-pack nutrition label in France: the five-colour Nutri-Score. *Public health panorama* 03, 712–725.
- Chapa, J., Farkas, B., Bailey, R.L., Huang, J.-Y., 2020. Evaluation of environmental performance of dietary patterns in the United States considering food nutrition and satiety. *Sci. Total Environ.* 722, 137672. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137672>
- Commission européenne, 2005. Règlement (CE) no 2073/2005 de la Commission du 15 novembre 2005 concernant les critères microbiologiques applicables aux denrées alimentaires.
- Commission européenne, 2013. L'éco-innovation, la clé de la compétitivité future de l'Europe [en ligne]. Disponible sur : <https://ec.europa.eu/environment/pubs/pdf/factsheets/ecoinnovation/fr.pdf> (consulté le 25 octobre 2021).
- Commission européenne, 2020. Farm to Fork Strategy: For a fair, healthy and environmentally -friendly food system [en ligne]. Disponible sur : https://ec.europa.eu/food/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf (consulté le 22 avril 2022).
- Conseil National de l'Emballage, 2012. Eco-conception & Emballages Guide méthodologique.
- Cooreman-Algoed, M., Huysveld, S., Lachat, C., Dewulf, J., 2020. How to integrate nutritional recommendations and environmental policy targets at the meal level: A university canteen example. *Sustain. Prod. Consum.* 21, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.10.004>
- Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C.C., Colomb, B.B., Guichard, L.L., Reau, R., Doré, T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques* 20, 35–48.
- Danic, F., Lepochat, S., Lévêque, B., Moniot, L., Neveux, G., 2014. Comment utiliser les flux indicateurs et méthodes ACV existants pour traiter l'impact sur la biodiversité (Technical Report No. 2013–01). SCORE LCA.
- Danone, 2017. Document de référence rapport financier annuel [en ligne]. Disponible sur : https://www.danone.com/content/dam/danone-corp/publications/publicationsfr/2018%2004%2012%20Danone-Document_de_Reference_2017.pdf (consulté le 14 mars 2022).
- Darmon, N., Vieux, F., Maillot, M., Volatier, J.-L., Martin, A., 2009. Nutrient profiles discriminate between foods according to their contribution to nutritionally adequate diets: a validation study using linear programming and the SAIN,LIM system. *The American Journal of Clinical Nutrition* 89, 1227–1236. <https://doi.org/10.3945/ajcn.2008.26465>

- Darmon, N., 2021. Empreinte environnementale des aliments. Sur quelle base les comparer ? [Interview de N. Darmon]. Lettre infos ELSA-PACT, Chaire ELSA-PACT. 10.1038/s43016-021-03376063
- Dean, M., 2022. A practical guide to multi-criteria analysis. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15007.02722>
- Debuschewitz E., Sanders J., 2022. Environmental impacts of organic agriculture and the controversial scientific debates. *Org. Agr.* 12, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s13165-021-00381-z>
- Depledt F., Sauvageot F., 2002. Evaluation sensorielle des produits alimentaires. *Techniques de l'ingénieur*.
- Drewnowski, A., Rehm, C.D., Martin, A., Verger, E.O., Voinnesson, M., Imbert, P., 2015. Energy and nutrient density of foods in relation to their carbon footprint. *Am. J. Clin. Nutr.* 101, 184–191. <https://doi.org/10.3945/ajcn.114.092486>
- FAO, 2004. Systèmes d'analyse des risques-points critiques et leur maîtrise (HACCP) [en ligne]. Disponible sur : <https://www.fao.org/3/y1579f/y1579f03.htm> (consulté le 2 août 2022).
- FAO, 2014. Food Wastage Footprint: Full-Cost Accounting, Final Report. Rome, FAO.
- Ferrero, 2021. Nos engagements : Qualité et sécurité [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ferrero.fr/qualite-et-securite> (consulté le 18 août 2022).
- France stratégie, 2021. Pour une alimentation saine et durable. Analyse des politiques de l'alimentation en France. Rapport pour l'Assemblée nationale [en ligne]. Disponible sur : https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2021-rapport-pour_une_alimentation_saine_et_durable-septembre.pdf (consulté le 2 avril 2022).
- Garnett, T., 2011. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy, The challenge of global food sustainability* 36, S23–S32. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2010.10.010>
- Garnett, T., 2013. Food sustainability: problems, perspectives and solutions. *Proceedings of the Nutrition Society* 72, 29–39. <https://doi.org/10.1017/S0029665112002947>
- GIEC, 2019. *Réchauffement planétaire de 1,5 °C* [en ligne]. Disponible sur : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf (consulté le 12 novembre 2021).
- Gouvernement français, 2022. Affichage environnemental des produits alimentaires. Bilan de l'expérimentation et enseignements [en ligne]. Disponible sur : <https://librairie.ademe.fr/consommer-autrement/5465-affichage-environnemental-des-produits-alimentaires.html> (consulté le 7 juin 2022).
- Green, A., Nemecek, T., Chaudhary, A., Mathys, A., 2020. Assessing nutritional, health, and environmental sustainability dimensions of agri-food production. *Glob. Food Secur.* 26, 100406. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100406>
- Grigoriadis, V., Nugent, A., Brereton, P., 2021. Working towards a combined measure for describing environmental impact and nutritive value of foods: A review. *Trends Food Sci. Technol.* 112, 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.03.047>

- Hendrie, G.A., Baird, D., Ridoutt, B., Hadjikakou, M., Noakes, M., 2016. Overconsumption of Energy and Excessive Discretionary Food Intake Inflates Dietary Greenhouse Gas Emissions in Australia. *Nutrients* 8, 690. <https://doi.org/10.3390/nu8110690>
- Henry, C., 2005. Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutrition*, 8, 1133–1152. <https://doi.org/10.1079/phn2005801>
- ILCD, 2010. General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. Luxembourg, Union européenne.
- Ipsos, 2016. Alimentation durable : les français de plus en plus attentifs à ce qu'ils mangent [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ipsos.com/fr-fr/alimentation-durable-les-francais-de-plus-en-plus-attentifs-ce-qu'ils-mangent> (consulté le 12 décembre 2021).
- ISO, 2003. Management environnemental – Intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement de produit. XP ISO/TR 14062, 36p.
- ISO, 2006a. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigence et lignes directrices. NF EN ISO 14044, 61p.
- ISO, 2006b. Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre. NF EN ISO 14040, 35p.
- ISO, 2009. Analyse sensorielle – Vocabulaire. NF EN ISO 5492, 123p.
- ISO, 2015. Systèmes de management environnemental – Exigences et lignes directrices pour son utilisation. NF EN ISO 14001, 53p.
- ISO, 2017. Analyse sensorielle – Méthodologie – Lignes directrices générales pour la réalisation d'épreuves hédoniques effectuées avec des consommateurs dans un espace contrôlé. NF EN ISO 11136, 57p.
- ISO, 2020a. Lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale. NF EN ISO 26000, 149p.
- ISO 2020b. Responsabilité sociétale et développement durable - Lignes directrices pour l'utilisation de l'ISO 26000:2010 dans la chaîne alimentaire. NF EN ISO/TS 26030, 54p.
- ITAB (Institut de l'agriculture et de l'alimentation biologiques), 2020. Questions sur la pertinence des données Agribalyse 3.0 pour l'évaluation environnemental des produits alimentaires [en ligne]. Disponible sur : http://itab.asso.fr/divers/Note%20ITAB_ACV%20&%20Agribalyse%2020201211_web.pdf. (consulté le 14 novembre 2021).
- Jolliet, O., Dubreuil, A., Gloria, T., Hauschild, M., 2005. Progresses in Life Cycle Impact Assessment within the UNEP/SETAC Life Cycle Initiative. *Int J Life Cycle Assessment* 10, 447–448. <https://doi.org/10.1065/lca2005.11.006>
- Lawless, H., T., Heymann, H., 1998. Sensory evaluation of food: principles and practices. New York, Chapman and Hall.
- Lazarides, H.N., 2012. Challenges and Opportunities for the community of Food Sciences to contribute Towards a Society of Healthier Consumers and a Better World. *Int. J. Food Stud.* 1. <https://doi.org/10.7455/ijfs/1.1.2012.a10>

- Lefebvre, A., Bassereau, J.M., 2003. L'analyse sensorielle, une méthode de mesure au service des acteurs de la conception : ses avantages, ses limites, ses voies d'amélioration. Application aux emballages. Belfort, 10ème Séminaire CONFERE, p. 3-11.
- Le Féon, S., Dubois, T., Jaeger, C., Wilfart, A., Akkal-Corfini, N., Bacenetti, J., Costantini, M., Aubin, J., 2021. DEXiAqua, a Model to Assess the Sustainability of Aquaculture Systems: Methodological Development and Application to a French Salmon Farm. *Sustainability* 13, 7779. <https://doi.org/10.3390/su13147779>
- Légifrance, 2022. *Décret n° 2022-539 du 13 avril 2022 relatif à la compensation carbone et aux allégations de neutralité carbone dans la publicité* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000045570611> (consulté le 18 juin 2022).
- Lemaire, A., Limbourg, S., 2019. How can food loss and waste management achieve sustainable development goals? *Journal of Cleaner Production* 234, 1221–1234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.226>
- Le Monde, 2017. Le scandale alimentaire, scénario à répétition du secteur agroalimentaire et de la grande distribution [en ligne]. Disponible sur : https://www.lemonde.fr/planete/article/2017/08/11/le-scandale-alimentaire-scenario-a-repetition-de-l-agroalimentation-mondialisee_5171473_3244.html (consulté le 12 juin 2022).
- Le Monde, 2021. Loi Climat : « Une méthode qui permet de mieux évaluer les impacts environnementaux des systèmes d'élevage, intensifs ou extensifs » [en ligne]. Disponible sur : https://www.lemonde.fr/idees/article/2021/12/28/loi-climat-une-methode-qui-permet-de-mieux-evaluer-les-impacts-environnementaux-des-systemes-d-elevage-intensifs-ou-extensifs_6107494_3232.html (consulté le 10 juin 2022).
- Li, M., Jia, N., Lenzen, M., Malik, A., Wei, L., Jin, Y., Raubenheimer, D., 2022. Global food-miles account for nearly 20% of total food-systems emissions. *Nat Food* 3, 445–453. <https://doi.org/10.1038/s43016-022-00531-w>
- L'Opinion, 2016. Agroalimentaire : ces industriels qui font le pari du durable [en ligne]. Disponible sur : <https://www.lopinion.fr/economie/agroalimentaire-ces-industriels-qui-font-le-pari-du-durable> (consulté le 25 avril 2022).
- LSA, 2020. Le coût des produits, principal frein à une alimentation plus responsable [en ligne]. Disponible sur : <https://www.lsa-conso.fr/le-cout-des-produits-principal-frein-a-une-alimentation-plus-responsable,357628> (consulté le 28 juin 2022).
- Masset, G., Soler, L.-G., Vieux, F., Darmon, N., 2014. Identifying Sustainable Foods: The Relationship between Environmental Impact, Nutritional Quality, and Prices of Foods Representative of the French Diet. *J. Acad. Nutr. Diet.* 114, 862–869. <https://doi.org/10.1016/j.jand.2014.02.002>
- Masset, G., Vieux, F., Darmon, N., 2015. Which functional unit to identify sustainable foods? *Public Health Nutr.* 18, 2488–2497. <https://doi.org/10.1017/S1368980015000579>
- Massoud, M.A., Fayad, R., El-Fadel, M., Kamleh, R., 2010. Drivers, barriers and incentives to implementing environmental management systems in the food industry: A case of Lebanon. *Journal of Cleaner Production* 18, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.022>
- McLaren, S., Berardy, A., Henderson, A., Holden, N., Huppertz, T., Jolliet, O., De Camillis, C., Renouf, M., Rugani, B., Saarinen, M., van der Pols, J., Vázquez-Rowe, I., Antón Vallejo, A., Bianchi, M.,

- Chaudhary, A., Chen, C., CooremanAlgoed, M., Dong, H., Grant, T., Green, A., Hallström, E., Hoang, H., Leip, A., Lynch, J., McAuliffe, G., Ridoutt, B., Saget, S., Scherer, L., Tuomisto, H., Tyedmers, P., van Zanten, H., 2021. Integration of environment and nutrition in life cycle assessment of food items: opportunities and challenges. Rome, FAO.
- Meiselman, L.M., Schutz, G.S., 2003. History of food acceptance research in the US Army. *Appetite*, 40, 199-216.
- Mie, A., Andersen, H.R., Gunnarsson, S., Kahl, J., Kesse-Guyot, E., Rembiałkowska, E., Quaglio, G., Grandjean, P., 2017. Human health implications of organic food and organic agriculture: a comprehensive review. *Environmental Health* 16, 111. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0315-4>
- Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2009. Denrées alimentaires : critères microbiologiques d'hygiène des procédés [en ligne]. Disponible sur : <https://agriculture.gouv.fr/denrees-alimentaires-criteres-microbiologiques-dhygiene-des-procedes> (consulté le 20 août 2022).
- Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2013. Maîtrise des produits phytosanitaires – Limites maximales de résidus (LMR) [en ligne]. Disponible sur : <https://agriculture.gouv.fr/maitrise-des-produits-phytosanitaires-limites-maximales-de-residus> `lmr#:~:text=La%20LMR%20est%20fix%C3%A9%20pour,frais%20d%C3%A9passe%200.1%20mg%20%2F%20kg` (consulté le 19 août 2022).
- Ministère de l'agriculture et de la souveraineté alimentaire, 2020. La réglementation sur l'hygiène des aliments [en ligne]. Disponible sur : [https://agriculture.gouv.fr/la-reglementation-sur-lhygiene-des-aliments#:~:text=Le%20r%C3%A8glement%20\(CE\)%20n%C2%B0,et%20de%20l%27alimentation%20animale](https://agriculture.gouv.fr/la-reglementation-sur-lhygiene-des-aliments#:~:text=Le%20r%C3%A8glement%20(CE)%20n%C2%B0,et%20de%20l%27alimentation%20animale) (consulté le 19 septembre 2022).
- Ministère de la santé et de la prévention, 2022. Les chartes d'engagements volontaires de progrès nutritionnel [en ligne]. Disponible sur : <https://solidarites-sante.gouv.fr/prevention-en-sante/pre-server-sa-sante/le-programme-national-nutrition-sante/article/les-chartes-d-engagements-volontaires-de-progres-nutritionnel> (consulté le 17 août 2022).
- Ministère de la transition écologique, 2017. Loi de transition énergétique pour la croissance verte [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-transition-energetique-croissance-verte> (consulté le 17 mai 2022).
- Ministère de la transition écologique, 2022a. La loi anti-gaspillage pour une économie circulaire [en ligne]. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-anti-gaspillage-economie-circulaire> (consulté le 16 mai 2022).
- Ministère de la transition écologique, 2022b. Biodéchets [en ligne]. Disponible sur : <https://www.ecologie.gouv.fr/biodechets> (consulté le 16 mai 2022).
- Ministère de l'économie des finances et de la relance, 2021. Que sont les sociétés à mission ? [en ligne] Disponible sur : <https://www.economie.gouv.fr/cedef/societe-mission> (consulté le 16 mai 2022).
- Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, 2019. Déclaration nutritionnelle sur les denrées alimentaires [en ligne]. Disponible sur : <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/Publications/Vie-pratique/Fiches-pratiques/declaration-nutritionnelle-sur->

denrees-alimentaires#:~:text=Le%20contenu%20de%20la%20d%C3%A9claration%20nutritionnelle%20obligatoire%20inclut%20les%20%C3%A9l%C3%A9ments,de%20prot%C3%A9ines%20et%20de%20sel (consulté le 12 juin 2022).

Ministère de l'économie, des finances et de la souveraineté industrielle et numérique, 2021. Comment définit-on les petites et moyennes entreprises ? [en ligne]. Disponible sur : <https://www.economie.gouv.fr/cedef/definition-petites-et-moyennes-entreprises> (consulté le 27 mai 2022).

Ministère des solidarités et de la santé, 2019. Programme national nutrition santé 2019-2023.

Monsivais, P., Scarborough, P., Lloyd, T., Mizdrak, A., Luben, R., Mulligan, A.A., Wareham, N.J., Woodcock, J., 2015. Greater accordance with the Dietary Approaches to Stop Hypertension dietary pattern is associated with lower diet-related greenhouse gas production but higher dietary costs in the United Kingdom. *The American Journal of Clinical Nutrition* 102, 138–145. <https://doi.org/10.3945/ajcn.114.090639>.

Munda G., Nijkamp P., Rietveld P., 1994. Qualitative multicriteria evaluation for environmental management. *Ecological Economics*, 10, 97–112.

Myllyviita, T., Sironen, S., Saikku, L., Holma, A., Leskinen, P., Palme, U., 2019. Assessing biodiversity impacts in life cycle assessment framework - Comparing approaches based on species richness and ecosystem indicators in the case of Finnish boreal forests. *Journal of Cleaner Production* 236, 117641. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117641>

OMS, 2004. Global Strategy on Diet, Physical Activity and Health. Genève, Fifty-seventh World Health Assembly.

ONU, 2017. La population mondiale devrait atteindre 9,8 milliards en 2050 et 11,2 milliards en 2100, selon l'ONU [en ligne]. Disponible sur : <https://news.un.org/fr/story/2017/06/359662-la-population-mondiale-devrait-atteindre-98-milliards-en-2050-et-112-milliards> (consulté le 9 février 2021).

Opinionway pour Sofinscope, 2015. Les Français et leur budget dédié à l'alimentation [en ligne]. Disponible sur : <https://www.slideshare.net/contactOpinionWay/opinionway-pour-sofinco-les-franais-et-leur-budget-ddi-lalimentation-vague-5-mars-2017> (consulté le 28 août 2022).

Palacios-Argüello, L., Gondran, N., Nouira, I., Girard, M.-A., Gonzalez-Feliu, J., 2020. Which is the relationship between the product's environmental criteria and the product demand? Evidence from the French food sector. *Journal of Cleaner Production* 244, 118588. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118588>

Pauer E., Wohner B., Heinrich V., Tracker M., 2019. Assessing the Environmental Sustainability of Food Packaging: An Extended Life Cycle Assessment including Packaging-Related Food Losses and Waste and Circularity Assessment. *Sustainability* 11, 925. <https://doi.org/10.3390/su11030925>

Planet score, 2021. *Planet score, prendre soin de la planète en faisant ses courses* [en ligne]. Disponible sur : <https://www.planet-score.org/> (consulté le 15 août 2022).

Ramachandra, T.V., Mahapatra, D., 2015. *The Carbon Footprint Handbook*. New York, Subramanian Senthilkannan Muthu.

- Recchia, L., Boncinelli, P., Cini, E., Vieri, M., Garbati Pegna, F., Sarri, D., 2011. *Multicriteria Analysis and LCA Techniques, Green Energy and Technology*. Springer, London.
<https://doi.org/10.1007/978-0-85729-704-4>
- Reganold, J.P., Wachter, J.M., 2016. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nature Plants* 2, 1–8.
<https://doi.org/10.1038/nplants.2015.221>
- République française, 2016. LOI n°2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages [en ligne]. Disponible sur : https://www.legifrance.gouv.fr/download/pdf?id=JO53V_65dij67IRvMQoMmHtIAj0JcaOEDqWlfcIQeWk= (consulté le 17 mai 2022).
- République française, 2019. Programme National de l’Alimentation et de la Nutrition.
- Réseau EcoSD, 2013. Rapport de synthèse sur l’éco-innovation.
- Ridoutt, B. G., Hendrie, G. A., & Noakes, M., 2017. Dietary Strategies to Reduce Environmental Impact: A Critical Review of the Evidence Base. *Advances in Nutrition*, 8, 933–946.
<https://doi.org/10.3945/an.117.016691>
- Roy P., Nei D., Orikasa T., Xu Q., Okadome H., Nakamura N., Shiina T., 2009. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering* 90, 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.06.016>.
- Saarinen, M., Fogelholm, M., Tahvonon, R., Kurppa, S., 2017. Taking nutrition into account within the life cycle assessment of food products. *J. Clean. Prod.* 149, 828–844. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.062>
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-É., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 163–174.
<https://doi.org/10.1051/agro:2007043>
- Saguy, I.S., Singh, R.P., Johnson, T., Fryer, P.J., Sastry, S.K., 2013. Challenges facing food engineering. *Journal of Food Engineering* 119, 332–342. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.05.031>
- Sala S., Cerutti A.K., Pant R., 2018. Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. Luxembourg, Office des publications de l’Union européenne.
<https://doi.org/10.2760/945290>
- Sala, S., Beylot, A., Corrado, S., Crenna, E., Sanye Mengual, E. and Secchi, M., 2019. Indicators and assessment of the environmental impact of EU consumption. Luxembourg, Office des publications de l’Union européenne. <https://doi.org/10.2760/25774>
- Salazar T, M.B., Cai, H., Bailey, R., Huang, J.-Y., 2019. Defining nutritionally and environmentally healthy dietary choices of omega-3 fatty acids. *J. Clean. Prod.* 228, 1025–1033.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.359>
- Santé publique France, 2022. Nutri-Score [en ligne]. Disponible sur : <https://www.santepublique-france.fr/determinants-de-sante/nutrition-et-activite-physique/articles/nutri-score> (consulté le 16 aout 2022).

- Scarborough, P., Rayner, M., 2010. Nutrient Density to Climate Impact index is an inappropriate system for ranking beverages in order of climate impact per nutritional value. *Food Nutr Res* 54. <https://doi.org/10.3402/fnr.v54i0.5681>
- Scientific Committee of the Nutri-Score, 2022. Update of the Nutri-Score algorithm [en ligne]. Disponible sur : https://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/maj_rapport_nutri-score_rapport_algorithme_2022_.pdf (consulté le 2 septembre 2022).
- Silva, V.L., Sereno, A.M., do Amaral Sobral, P.J., 2018. Food Industry and Processing Technology: On Time to Harmonize Technology and Social Drivers. *Food Eng. Rev.* 10, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s12393-017-9164-8>
- Smedman, A., Lindmark-Månsson, H., Drewnowski, A., Edman, A.-K.M., 2010. Nutrient density of beverages in relation to climate impact. *Food & Nutrition Research* 54, 5170. <https://doi.org/10.3402/fnr.v54i0.5170>
- Soler, L.G., Aggeri, F., Dourmad, J.Y. Hélias, A., Julia, C., Nabec, L., Pellerin S., Ruffieux, B., Trystram, G., Van der Werf, H., 2021. L’affichage environnemental des produits alimentaires. Rapport du Conseil Scientifique -Synthèse-.
- Soler L.G., Van de Werf H.M.G., Muller L., Gascuel C., Colomb V., Rimbaud A., Mousset J., 2020. L’affichage environnemental des produits alimentaires : Quelles modalités, quelles données, quels usages ? Document de travail.
- Sonesson, U., Davis, J., Hallström, E., Woodhouse, A., 2019. Dietary-dependent nutrient quality indexes as a complementary functional unit in LCA: A feasible option? *J. Clean. Prod.* 211, 620–627. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.171>
- Stein, A.J., Santini, F., 2022. The sustainability of “local” food: a review for policy-makers. *Rev. Agric. Food Environ. Stud.* 103, 77–89. <https://doi.org/10.1007/s41130-021-00148-w>
- Teixeira, R., Himeno, A., Gustavus, L., 2013. Carbon footprint of breton pâté production: A case study. *Integrated Environmental Assessment and Management* 9, 645–651. <https://doi.org/10.1002/ieam.1458>
- Tharrey, M., Honvo Houeto, E., Dubois, C., Vieux, F., Maillot, M., Darmon, N., 2017. Comparaison de la classification de recettes par trois systèmes de profilage nutritionnel : SAIN, LIM, SENS et 5-C. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 52, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.cnd.2017.04.005>
- Tukker A., Huppel G., Geerken T., Nielsen P., 2006. Environmental Impact of Products (EIPRO): Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25. Technical Report Series.
- Tuomisto, H. L., Hodge, I. D., Riordan, P. & Macdonald, D. W., 2012. Does organic farming reduce environmental impacts? A meta-analysis of European research. *J. Environ. Manage.* 112, 309–320. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.08.018>
- Union européenne, 2021. Recommandation (UE) 2021/2279 de la commission du 15 décembre 2021 relative à l’utilisation de méthodes d’empreinte environnementale pour mesurer et indiquer la performance environnementale des produits et des organisations sur l’ensemble du cycle de vie. Journal officiel de l’Union européenne.

- Van der Werf, H., Knudsen, M., Cederberg, C., 2020. Towards better representation of organic agriculture in life cycle assessment. *Nature Sustainability* 3, 419–425. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0489-6>
- Van Dooren, C., Douma, A., Aiking, H., Vellinga, P., 2017. Proposing a Novel Index Reflecting Both Climate Impact and Nutritional Impact of Food Products. *Ecol. Econ.* 131, 389–398. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.08.029>
- Van Raaij, J., Hendriksen, M., Verhagen, H., 2009. Potential for improvement of population diet through reformulation of commonly eaten foods. *Public Health Nutrition*, 12(3), 325–330. <https://doi.org/10.1017/s1368980008003376>
- Vieux, F., Soler, L.-G., Touazi, D., Darmon, N., 2013. High nutritional quality is not associated with low greenhouse gas emissions in self-selected diets of French adults. *Am. J. Clin. Nutr.* 97, 569–583. <https://doi.org/10.3945/ajcn.112.035105>
- Visschers, V.H.M., Siegrist, M., 2015. Does better for the environment mean less tasty? Offering more climate-friendly meals is good for the environment and customer satisfaction. *Appetite* 95, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.08.013>
- Weber, C.L., Matthews, H.S., 2008. Food-Miles and the Relative Climate Impacts of Food Choices in the United States. *Environ. Sci. Technol.* 42, 3508–3513. <https://doi.org/10.1021/es702969f>
- Weidema, B.P., Stylianou, K.S., 2020. Nutrition in the life cycle assessment of foods—function or impact? *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 1210–1216. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01658-y>
- Woodhouse, A., Davis, J., Pénicaud, C., Östergren, K., 2018. Sustainability checklist in support of the design of food processing. *Sustainable Production and Consumption* 16, 110–120. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2018.06.008>
- Xu, Z., Xu, W., Peng, Z., Yang, Q., Zhang, Z., 2018. Effects of different functional units on carbon footprint values of different carbohydrate-rich foods in China. *J. Clean. Prod.* 198, 907–916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.091>
- Yannou-Le Bris G., Serhan H., Duchaine S., Ferrandi J.M., Trystram G., 2019. *Ecoconception et éco-innovation dans l'agroalimentaire*. ISTE editions
- Zampori, L., Pant, R., 2019. Propositions en vue de la mise à jour de la méthode de l’empreinte environnementale de produit (PEF). In Eur 29682 FR. Luxembourg, Office des publications de l’Union européenne.

ANNEXE 1 : DATA PAPER ASSOCIE A L'ARTICLE 1.

Life cycle inventory and assessment data for quantifying the environmental impacts of a wide range of food products belonging to the same food category: a case study of 80 pizzas representatives of the French retail market

Adeline Cortesi¹, Caroline Pénicaud¹, Anne Saint-Eve¹, Louis-Georges Soler², Isabelle Souchon³

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

² Université Paris-Saclay, INRAE, UR ALISS, 94205, Ivry-sur-Seine, France

³ Avignon Université, INRAE, UMR SQPOV, 84000, Avignon, France

Abstract

Most of the time, Life Cycle Assessments (LCA) of food products are performed only on one representative of a food category. This doesn't allow us to understand the possible variations of environmental impacts within a food product category and the responsible factors for these variations. For this reason, LCA were conducted for 80 different industrial pizzas representative of the French retail market. The LCA were performed using the "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set" on SimaPro software. Most of the data used were taken from the AGRIBALYSE 3.0 and Ecoinvent 3.6 databases. The system perimeter goes from the production of the ingredients to the pizza consumption. The functional unit used was 1 kg of ready-to-eat pizza. Life cycle inventories were made to include the different flows in the LCA (materials, transport, energy, water, waste, etc.). The dataset contains details on products, life-cycle inventories (LCI) and LCIA results. These data can enrich the discussion on the need to study the environmental impacts of different products belonging to the same food category and not only one representative in order to avoid erroneous conclusions.

Keywords

Life cycle assessment (LCA), food industry, supply chain, processed food, recipe

Specifications Table

Subject	Environmental Engineering
Specific subject area	Environmental assessment in the food industry

Type of data	Table
How data were acquired	Inventory data were found in scientific and technical literature completed by experts' opinions. Life-cycle assessment using SimaPro software and the « EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set » was performed. Data from the AGRIBALYSE 3.0 and Ecoinvent 3.6 databases were mainly used.
Data format	Raw Analysed
Parameters for data collection	80 pizzas representative of the pizza retail market in France in terms of recipes, sectors and distributors were selected. Primary data consisted of information written on the packaging of pizzas and weighting of the packaging. Secondary data was collected from scientific literature, machine data sheets or expert estimates.
Description of data collection	The 80 pizzas were selected among the 392 from the French market available in OQALI database. Pizzas recipes were estimated based on the packaging information: the nutritional compositions and the ingredient lists. The recipe of pizza dough was estimated according to an online recipe. Data related to cheeses were estimated according to internal studies. The consumptions needed for the production of the pizzas (energy, water, materials) were estimated using scientific literature, machine data sheets and expert estimates. The weights of the pizza packaging were measured on a balance. Transportation distances were calculated based on assumptions. Storage times and conditions at the wholesaler and at the point of sale were taken from the DEFRA report [1]. The storage times at the consumer's home are based on assumptions and the electricity consumption data related to storage and cooking are taken from data sheets. AGRIBALYSE 3.0 and Ecoinvent 3.6 databases were used for background LCI. Both these databases were directly available in Simapro software. LCIA data and single scores were calculated by LCA using the "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set" on SimaPro software.

Data source location	Inventory data from France were selected, when available. In case no such data were available, European data were selected and then global data if no European data were available. All the inventory and calculated data used in this study are stored in INRAE research center in Thiverval-Grignon (FR)
Data accessibility	Repository name: Data INRAE Direct URL to data: https://doi.org/10.15454/IH2ERI
Related research article	Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.G., Souchon, I., Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market. Journal of Cleaner Production 336 (2022), 130128. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130128

Value of the Data

The article presents a unique set of LCI and LCIA data from a set of 80 products from the same food category.

These data can enrich the discussion on the need to study the environmental impacts of different products belonging to the same food category and not only one representative in order to avoid erroneous conclusions.

These data can be used as relevant information for assessment of food sector sustainability.

These data can also be used to make recommendations for more environmentally friendly pizza choices or for pizza reformulation.

1. Data Description

The dataset associated with this article contains files containing information, inventory data required for the LCA and the LCIA results obtained for the 80 pizzas presented in the associated article [2]:

1. dataset_pizzas_nutritional data: nutritional characteristics and composition information on the 80 pizzas: energy, fats, saturated fatty acids, carbohydrates, sugars, fibers, proteins, sodium, dough/topping, mass animal products/mass vegetal products, % cheese, % tomato sauce and vegetables, % dough, % meat and fish.
2. dataset_pizzas_LCI recipes: recipes of the 80 studied pizzas. The recipes are presented for 1 kg of pizza with and without ingredient losses. The percentage of losses for each ingredient is also mentioned in this file.

3. dataset_pizzas_LCI ingredients: name of all the data used for the inventory of the ingredients directly taken from a database and the associated database.
4. dataset_pizzas_LCI other ingredients: inventories of the ingredients not taken directly from a database: dough (made from oil, salt, water, wheat flour and yeast) and cheeses (Asiago, Cheddar, Goat cheese, Comté, Edam, Emmental, Sheep cheese, Melted cheese, Gorgonzola, Gouda, Grana Padano, Maasdam, Mozzarella, Raclette, Roquefort). The names of all the data used for the inventories and the associated database are also given.
5. dataset_pizzas_LCI packaging: weight of the packaging of each of the 80 pizzas studied. The inventory as well as the name and the database of the data used to modelize the packaging is also available.
6. dataset_pizzas_LCI manufacturing: inventory of the flows taken into account for the manufacturing step. The flows included are energy (kWh and MJ), water, wastewater and food waste. The name and the database of the data used to modelize these flows are also mentioned.
7. dataset_pizzas_LCI transports: inventory of the transport from pizza factory to supplier and from supplier to retailer. Assumptions about the distances are provided (km), the total mass of each transported pizza (including packaging, kg) and the Ecoinvent processes used, as well as the type of transport (fresh/frozen) are given.
8. dataset_pizzas_LCI distribution: inventory data related to the storage of the pizzas at the wholesales and at the supermarket for both fresh and frozen pizzas. The flows included are electricity, heat, cooling liquid leak and waste. The Ecoinvent processes used are given.
9. dataset_pizzas_LCI use: electrical consumption of fridge storage and oven cooking for fresh and frozen pizzas for 2 scenarios of storage time. The weights of the packaging wastes taken into account in this step are also available in this file, as well as the names and the database of the data used to modelize the flows.
10. dataset_pizzas_LCIA: LCIA results obtained for the 80 pizzas calculated by the "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set" for the midpoint indicators: Climate change, Ozone depletion, Ionising radiation, Photochemical ozone formation, Particulate matter, Human toxicity, non-cancer, Human toxicity, cancer, Acidification, Eutrophication, freshwater, Eutrophication, marine, Eutrophication, terrestrial, Ecotoxicity, freshwater, Land use, Water use, Resource use, fossils, Resource use, mineral and metals. Results are presented by steps (ingredients, manufacturing, packaging, transport, distribution, use) and in total, for two scenarios: short home storage and long home storage.
11. dataset_pizzas_single score: single scores calculated for the 80 pizzas by the "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set".

2. Experimental Design, Materials and Methods

2.1. LCA methodology

Our study followed ISO 14040 and following standards [3].

2.1.1. Goal and scope

The goal of the study was to characterize the environmental impact of 80 industrial pizzas from the French retail market (hypermarkets and supermarkets). These pizzas have been chosen to represent the entire French retail market.

2.1.2. System definition

Several steps in the life cycle of pizzas were considered (Figure 1): ingredient production, ingredient transportation, manufacturing of the pizza in the factory, transportation of the pizza, distribution, sale, and domestic use. All the steps mentioned in Figure 1 are taken into account in the inventory. The waste board and plastic packaging are therefore taken into account.

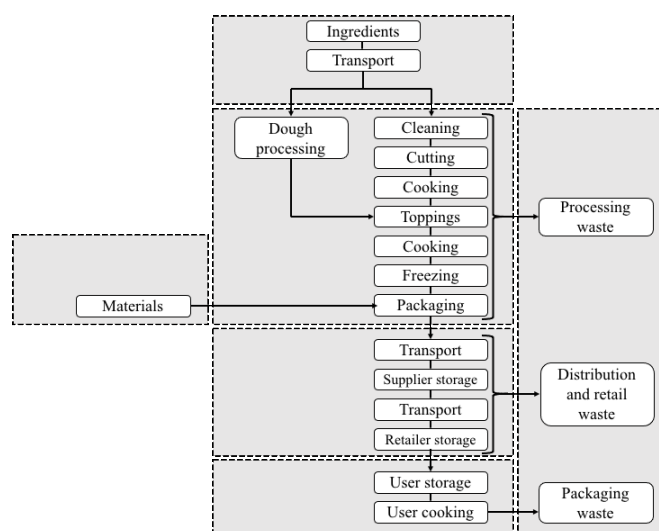


Figure 1. Steps in pizza production considered in the LCA

The flows that were considered were raw materials, water, and energy consumption. Emissions generated by agricultural production of the raw ingredients, packaging materials, electricity, heat and water production, transports as well as emissions due to refrigerant leaks, are already included in the data used (selected in databases). The LCI of the production of the equipment were not taken into account due to their long lifetimes which lead to low environmental impacts when we allocate equipment LCI to its use duration.

Losses, estimated from the ADEME report [4], were considered for pizzas at the retail step. Losses associated with the removal of inedible parts of fresh vegetables used at the manufacturing step were also considered. These various losses are presented in Table 1.

Table 1. Percentage of loss for various food products at various steps

(from [4]) («NA» means not applicable)

	Manufacturing (%)	Retail (%)
Artichoke	80	NA
Basil	20	NA
Carrot	20	NA
Eggplant	20	NA
Garlic	20	NA
Mushroom	20	NA
Olive	50	NA
Onion	20	NA
Pepper	3	NA
Spinach	3	NA
Zucchini	3	NA
Fresh pizza	NA	5
Frozen pizza	NA	0.6

Losses were summed at each step to calculate the total loss. Thus, the mass of an ingredient considered in the agricultural phase corresponds to the sum of the mass of this ingredient in the final pizza and the losses related to the manufacturing and retail steps.

Losses at the consumer's home were not considered. Similarly, the cleaning of the plant and the transportation of the pizza from the point of sale to the consumer's home were also not considered.

2.1.3. Functional Unit

We chose to use a mass functional unit, which is the functional unit commonly used for the study of the environmental impact of food products. The functional unit used was therefore 1 kg of ready-to-eat pizza (after removing the packaging and cooking) at the consumer's home. We decided to choose a functional unit of 1 kg of pizza ready-to-eat and not at the supermarket because we wanted to evaluate the relative weight of the environmental impact of the use step, including fridge storage and oven cooking. Furthermore, this FU allowed us to compare two scenarios of pizza home storage (short and long durations).

2.1.4. Inventory & data collection

2.1.4.1. Ingredients

Estimating the proportion of each ingredient in the pizza

The ingredients of each pizza are listed on their packaging in descending order of weight. However, the exact content of each ingredient within a pizza is not mentioned. The nutritional labeling of the pizzas was, thus, used to estimate the mass of each ingredient in the final pizza.

Databases

The database that was mostly used was Agribalyse (v3.0) for agricultural and food products, completed with data from Ecoinvent (v3.6) for other data. We used data from the literature for mushrooms [5].

Cheese

Cheese is an ingredient present in significant quantities in all 80 pizzas studied. Nevertheless, it comes in different forms and 15 different cheeses were identified for all 80 pizzas studied. However, the AGRIBALYSE 3.0 database only distinguishes a few major categories of cheese. Importantly, the environmental impact of a variety of cheeses is highly dependent on the amount of milk used ([6] [7], [8]). Ripening time also plays an important role in the overall environmental impact of cheese because of the electricity consumption involved [89].

These two steps can vary greatly from one cheese to another. Thus, the environmental impact of the 16 cheeses is likely to vary. We therefore estimated the inventory data for each cheese by considering that the part related to the process was equivalent for all cheeses and by varying only the quantity of milk required to make the cheese and the ripening period. As part of the milk used to make the cheese is also used to make cream (during skimming (optional step)) and whey during draining, economic allocations were used to determine the portion of environmental impact attributable to the cheese.

The masses of cream and whey produced during the manufacture of each cheese were then estimated by attributing the loss of fats to the production of cream and the loss of post-skimming water to the production of whey.

Pizza manufacturing

The hypothesis of a relatively automated factory producing an average of 10,000 pizzas of 450 g each day during its 10 hours of daily operation was used. The consumption of the various machines considered for the different steps of pizza production (Table 2) were estimated based on the scientific literature, technical data sheets from the manufacturers of equipment used for the food industry, and expert estimates. The consumption of the machines running continuously was estimated for 10 hours of operation and then reduced to the mass of pizza produced in 10 hours. The consumption of machines considered to not run continuously was estimated for one cycle and then divided by the number of kilograms of pizza processed in one cycle.

Table 2. Steps of pizza production considered and associated machines. The machines mentioned may or may not be considered, depending on the pizza

Step	Machine(s)
Dough preparation	Mixer, elevator/unloader, dough-dividing dough rounder, treadmill
Vegetable preparation	Vegetable washer, cutting machine, cooker
Meat preparation	Cutting machine (cubes or slices), cooker
Cheese preparation	Cutting machine (cubes or slices)
Topping	Filling machines
Cooking	Electric, wood-fired oven
Freezing	Freezing machine
Packaging	Packaging machine, treadmill

Packaging

The weights of the plastic and cardboard packaging were measured by weighing them for each of the 80 pizzas using a PRECISA balance (XT 6200C), accuracy = 0.01 g.

Transport

Two steps of transport were considered: the transport of the pizza from the factory to the supplier and from the supplier to the retailer. The transport of the pizza from the retailer to the consumers' homes was not considered. We assumed that the supplier was 1,000 km from the pizza factory and the retailer 200 km from the supplier. Reefer cooling/freezing truck from Ecoinvent 3.6 database was used.

Distribution

The DEFRA Report [1] was used to estimate the duration of storage of fresh and frozen pizza at the supplier and the retailer. We considered that fresh pizzas were stored for 12 hours in a refrigerated warehouse at the supplier and 48 hours at the retailer, including 10 hours in a walk-in cooler and 38 hours in a display cabinet. For frozen pizzas, we considered that they were stored for 158 hours in a refrigerated warehouse at the supplier and 120 hours at the retailer, including 24 hours in a walk-in freezer and 96 hours in a display cabinet. The data contained in this report was then used to estimate the electrical consumption and loss of refrigerating liquids associated with these various storage conditions. Electrical consumption related to the lighting of the retailer was also considered. According to Tsarouhas et al. [10], a hypermarket consumes an average of 777kWh of electricity per m² of sales area per year, of which 15 to 25% is directly related to lighting. Volume allocations were made to estimate the

consumption linked solely to the storage of 1 kg of pizza for one hour. The values thus calculated were then weighted by the previously estimated duration of storage at the retailer for the two types of pizza.

Use

The steps we considered at the users' homes were storage and baking of the pizza in an electric oven. We hypothesized that the storage was two days for fresh and frozen pizzas. A complementary scenario was also tested to study the influence of the duration of domestic storage on the environmental impact of the pizzas, consisting of a "long" storage scenario, i.e., seven days for fresh pizzas and one year for frozen pizzas. A domestic freezer and refrigerator of equivalent dimensions (200 L and 201 L, respectively) were considered, and their respective electrical consumption was recorded from their data sheets. A volume allocation in these two appliances was made to estimate the electrical consumption solely related to the storage of one kilogram of pizza. The baking times for fresh and frozen pizzas were estimated based on the preparation tips on the pizza packaging. The electrical consumption of a conventional electric oven was defined using a technical data sheet of an appliance and then calculated for the cooking time required to cook 1 kg of pizza.

Ethics Statement

This work did not involve human subjects or laboratory animal, therefore did not meet any ethical issues.

Acknowledgments

This work was funded by INRA metaprogramme DID'IT. This work was also supported by French National Research Agency through the DataSusFood project (grant number ANR-19-DATA-0016).

The authors would like to thank Vincent Monclus, Anna Woodhouse and Hélène Bidault for their contributions to the preliminary version of this work.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships which have, or could be perceived to have, influenced the work reported in this article.

References

- [1] DEFRA. Greenhouse Gas Impacts of Food Retailing (Research Project FO0405 No. Greenhouse Gas Impacts of Food Retailing), DEFRA Department for the Environment Food and Rural Affairs, London, 2008.
- [2] Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.G., Souchon, I., Does environmental impact vary widely within the same food category? A case study on industrial pizzas from the French retail market. *Journal of Cleaner Production* 336 (2022), 130128. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130128>
- [3] ISO 14040:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Second edition, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006
- [4] ADEME, AGRIBALYSE 3.0. La base de données française d'ICV sur l'agriculture et l'alimentation, Rapport méthodologique – Annexes, 2020.
- [5] Bio Intelligence Service, Eco-emballages : Analyse de Cycle de Vie de produits vendus pré-emballés, à la coupe et en vrac, Etude de cas : champignons, 2008.
- [6] Bava, L., Bacenetti, J., Gislón, G., Pellegrino, L., D'Incecco, P., Sandrucci, A., Tamburini, A., Fiala, M., Zucali, M., Impact assessment of traditional food manufacturing: The case of Grana Padano cheese. *Science of The Total Environment* 626 (2018), 1200–1209. <https://doi.org/10.1016/j.sci-totenv.2018.01.143>
- [7] Dalla Riva, A., Burek, J., Kim, D., Thoma, G., Cassandro, M., De Marchri, M., Environmental life cycle assessment of Italian mozzarella cheese: Hotspots and improvement opportunities. *J. Dairy Sci.* 100 (2017), 7933–7952. <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12396>
- [8] Kim, D., Thoma, G., Nutter, D., Milani, F., Ulrich, R., Norris, G., Life cycle assessment of cheese and whey production in the USA. *Int J Life Cycle Assess* 18 (2013), 1019–1035. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0553-9>
- [9] Pénicaud, C., Ibanescu, L., Allard, T., Fonseca, F., Dervaux, S., Perret, B., Guillemin, H., Buchin, S., Salles, C., Dibie, J., Guichard, E., Relating transformation process, eco-design, composition and sensory quality in cheeses using PO2 ontology. *International Dairy Journal* 92 (2019), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2019.01.003>
- [10] Tassou, S.A., Ge, Y., Hadawey, A., Marriott, D., Energy consumption and conservation in food retailing. *Applied Thermal Engineering* 31 (2011), 147–156. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.08.023>

ANNEXE 2 : DATA PAPER ASSOCIE A L'ARTICLE 2

Data related to the Life Cycle Assessment of 44 artisanally produced French Protected Designation of Origin (PDO) cheeses

Adeline Cortesi¹, Laure Dijoux¹, Gwenola Yannou-Le Bris¹, Caroline Pénicaud^{1,*}

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

Abstract

Food production is associated with significant environmental impacts. To reduce these, it is first essential to better understand the environmental implications of production processes, and how these can vary among different products. Historically, most studies in this area have focused on comparing environmental impacts among different food categories, but here, we chose to investigate differences at a finer scale, among products belonging to the same category. Cheese was selected as our study model because it is one of the most popular types of food products around the world but is associated with significant environmental impacts. Specifically, we used Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate the environmental impacts of 44 French cheeses that benefit from Protected Designation of Origin (PDO) certification. Our assessments took into account all steps from milk production to the end of the ripening period and the functional unit used was 1 kg of fully ripened cheese. Inventories for milk production were obtained from AGRIBALYSE 3.0. Data on cheeses production stage were collected using PDO specifications, technical datasheets, scientific literature, and three expert opinions. Background inventories (electricity mix, gas production, materials, transport, water, cleaning products) were obtained from the Ecoinvent 3.6 database. Simapro software was used to conduct all LCA, using the characterization method "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalisation and weighting set". Our final dataset contains details on products, life cycle inventories (LCI), and LCIA results. These data could be useful for cheesemakers seeking to improve the environmental performance of their products.

Keywords

Life cycle assessment (LCA), food industry

Specifications Table

Subject	Environmental Engineering
Specific subject area	Environmental assessment in the food industry

Type of data	Table
How data were acquired	Data used in the inventory were obtained from scientific and technical literature, product specifications, and expert opinion. The method “EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set” was performed using SimaPro software. The databases used were AGRIBALYSE 3.0 and Ecoinvent 3.6.
Data format	Raw Analysed
Parameters for data collection	44 French PDO cheeses
Description of data collection	PDO specifications were used to identify all aspects of cheese production that are subject to legal definition (milk origin, ripening time, storage time, materials, and authorized transport length). Values of energy consumption related to milk pumping and milk processing steps were estimated based on equipment datasheets. For the base scenario, the energy consumption of the ripening step was estimated using data on two experimental ripening rooms (power requirements of equipment, number of ripened cheeses, and cheese weight). The electrical consumption was then estimated as the average estimated electrical consumption of this two ripening rooms. For the alternative scenario, measured data from the literature were used [1]. Water consumption was also estimated based on the scientific literature [2]. These data were complemented by expert opinions when necessary.
Data source location	Inventory data from France were selected in the Agribalyse 3.0 database for agricultural products. Data from France were selected in the Ecoinvent 3.6 database when possible and complemented by European and global data when necessary for other flows. All of the inventory and calculated data used in this study are stored in the INRAE research centre in Thiverval-Grignon (FR).
Data accessibility	Repository name: Data INRAE Direct URL to data: https://doi.org/10.15454/JQLIOX

Value of the Data

This article presents a unique set of LCI and LCIA data for 44 French PDO cheeses produced at artisanal scale.

These data represent an examination of the similarities and differences among numerous closely related food products, which could be useful for future LCA or research studies.

These data can also be used by cheesemakers who wish to have better knowledge of the environmental impacts of their products and production systems in order to reduce them.

1. Data description

All of the inventory data used for LCA of the 44 French PDO cheeses (analyzed from milk production to the end of ripening) and the LCIA results are available in the associated dataset.

The dataset contains several files:

1. data_PDOcheeses_characterization: data on the cheese technology, milk type (cow, goat, sheep), and ripening time of each cheese studied.
2. data_PDOcheeses_coproducts: mass of the co-products (cream and whey) estimated associated with the production of 1 kg of each cheese.
3. data_PDOcheeses_allocation: allocation factors estimated and used for the steps before skimming, for the steps from skimming to draining, and for the steps after draining for each cheese.
4. data_PDOcheeses_LCI: inventory data for all steps of the production of each cheese for two ripening scenarios, calculated for a FU of 1 kg of cheese at the end of the ripening step.
5. data_PDOcheeses_LCIA: all LCIA results calculated using the characterization method "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalisation and weighting set"
6. data_PDOcheeses_specifications: links to the PDO specifications of all cheeses.
7. data_PDOcheeses_datasheets: links to datasheets used for LCI related to equipment used for milk pumping and milk processing.
8. data_PDOcheeses_distances: maximal distance allowed to transport milk and/or cheese to be ripened, estimated on google maps according to the geographical area authorized in specifications.

2. Experimental design, materials, and methods

For this study, we followed the steps of the LCA methodology as described in [3].

2.1. Goal

The goal of the study was to assess the environmental impacts of 44 French PDO cheeses using attributional LCA in order to compare them, discover major hotspots and identify potential means of improving environmental performance.

2.2. System definition

The system boundary encompassed all steps going from the agricultural production of milk to the creation of the final ripened cheese product. Two different scenarios were studied. The first (base) scenario included milk production, milk transport, milk pumping, milk storage, milk processing, and cheese ripening in a small ripening room, as well as equipment cleaning. The second scenario (alternative scenario) differed from the first in that it included cheese transport to an off-site ripening room, where cheeses were ripened in a shared dedicated space (Figure 1). The flows that were considered are milk, cream, whey, cleaning products, water, energy consumption, and equipment materials. The different inputs and outputs included in the data (e.g. inputs and emissions for electricity production, inputs and emissions linked to transport, agricultural crop production for animal feeding) were also encompassed in the system boundary. The excluded activities were all activities occurring after the ripening step such as retailing or consumption. Dry basis allocations were used to allocate the environmental impacts between cheeses and cheeses co-products.

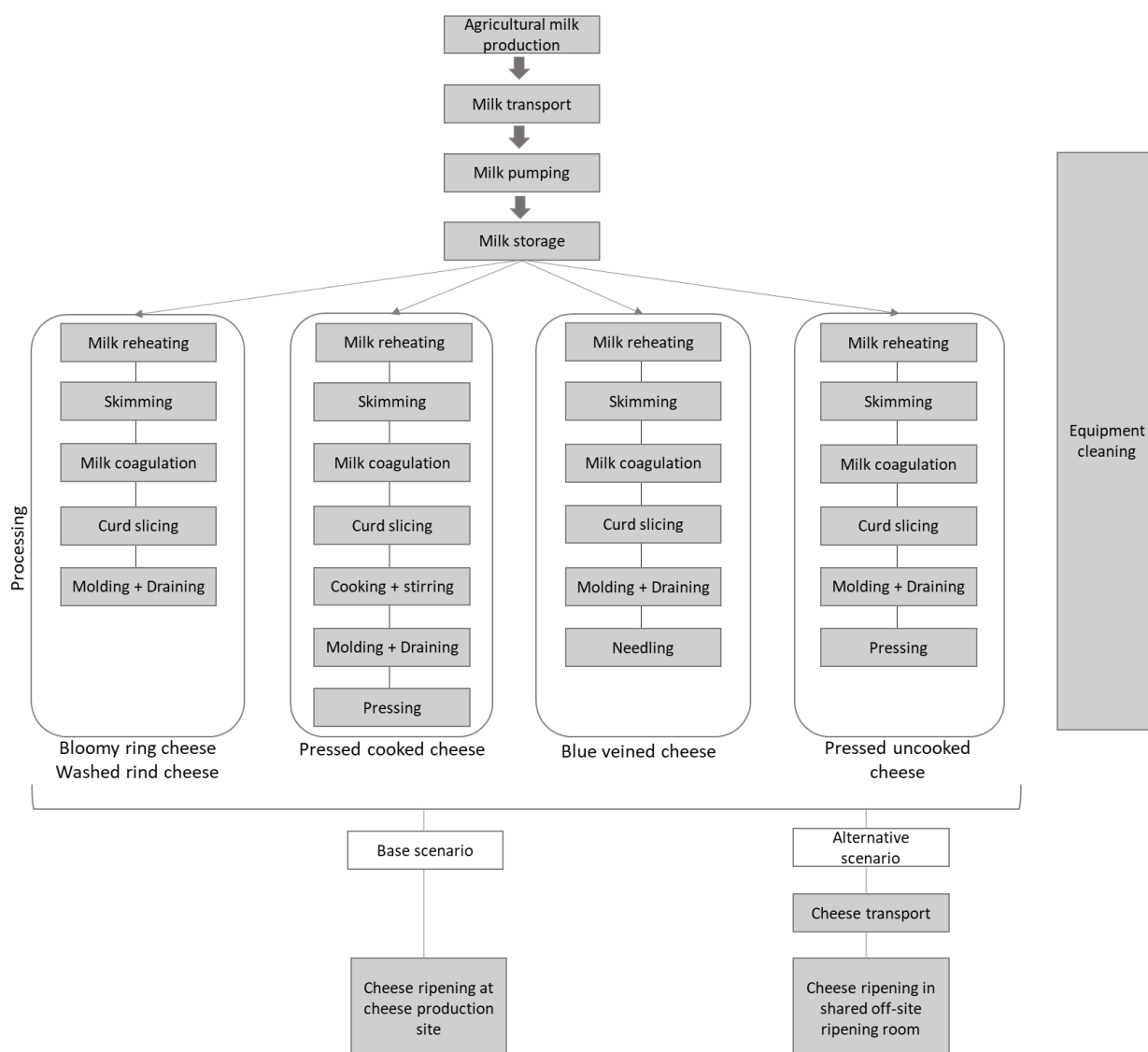


Figure 1. Steps of cheese production considered in the study

2.3. Functional Unit

The functional unit was 1 kg of cheese at the end of the ripening step. This functional unit allowed us to compare the different cheeses independently of their final weight and size.

2.4. Inventory and data collection

The inventory data were mainly collected from the cheese specifications which are regulatory documents containing all the requirements the cheese need to respect in order to be allowed to be certified as a PDO. Therefore, several information such as types of milk used, the geographical areas of production, production conditions, and authorized or prohibited utensils and equipment are written there and were used for LCI. Inventory data that were not availa-

ble in the specifications were obtained by interviewing three cheeses experts from the academic area in the cheese sector (acknowledged in the Acknowledgments section) and by literature research.

2.4.1. Milk production

The amount of milk necessary to produce 1 kg of cheese was estimated thanks to (i) for most cheeses, the knowledge of three cheeses experts from the academic area (acknowledged in the Acknowledgments section), (ii) completed by data found on cheesemakers websites when needed. For cow milk, highland and lowland cows were considered separately. All the data are presented in the associated dataset (data_PDOcheeses_LCI). Inventory data from AGRI-BALYSE 3.0 database were used for this step. Therefore, all inputs and outputs included in the background data were included in the calculation (e.g. water used for the production of animal feed, energy needed for harvesting, emissions linked to animals breeding...).

2.4.2. Milk transport

For each cheese, the maximum distance permitted by the specifications was used. All the distances used for the calculations are presented in the associated dataset (data_PDOcheeses_distances). Transportation was assumed to be land-based and refrigerated; the data used to model the refrigerated truck is available in data_PDOcheeses_LCI.

2.4.3. Milk pumping

This step corresponds to the transfer of milk from the refrigerated truck to the storage tank. We assumed that the same pump, one commonly used in dairy processes, was used for the milk transfer of all studied cheeses. The power used by the pump during the transfer was estimated from technical datasheets and electrical consumption was calculated following equation (1).

$$\text{Electrical consumption (kWh)} = \text{Power (W)} \times \text{Use time (h)} \quad (1)$$

The use time was the time needed to pump the milk amount needed calculated following equation (2).

$$\text{Use time (h)} = \frac{\text{Flow rate (L/h)}}{\text{Milk to pump (L)}} \quad (2)$$

The flow rate was obtained from the technical datasheet and the amount of milk necessary to produce 1 kg of cheese was obtained as described in section 2.4.1. The milk densities used to convert L into kg were 1.032 kg/L for cow milk, 1.023 kg/L for goat milk and 1.036 kg/L for sheep milk.

2.4.4. Milk storage

The duration of the milk storage step varied among the different cheeses, but for each cheese, we used the maximum storage time allowed in the specifications. For cheeses whose specifications did not mention storage times, estimates were made based on similar cheeses. The flows taken into account for this step were the electrical consumption linked to refrigeration and the materials of the vats. The electrical consumption was estimated according to

Equation (1) from the power needs of a refrigerated storage tank (found in a technical datasheet) and the use time being the longest storage time allowed in the specifications of each cheese.

For each cheese, the mass of material attributable to the storage step was calculated as shown in Equation (3).

$$\text{tank material mass (kg)} = \text{tank mass (kg)} * \frac{\text{time of use (h)}}{\text{lifetime (h)}} * \frac{\text{milk (kg)}}{\text{total milk (kg)}} \quad (3)$$

(Milk (kg): Mass of milk necessary to produce 1 kg of the cheese under consideration; Total milk (kg): Mass of the total milk capacity of the tank)

2.4.5. Milk processing

2.4.5.1. Skimming

Skimming is not performed for all cheeses. In most cases, we used the hypothesis that skimming is done by hand: the operator simply collects the cream that accumulates at the surface. Thus, no electrical input was considered for this step.

2.4.5.2. Milk reheating

If milk is put into cold storage after reception, it must be reheated before being processed. The electricity consumption of this step was calculated as the amount necessary to reheat the milk from its storage temperature (hypothesis: 4°C) to the optimal temperature, which is specific to each cheese. This was estimated using Equation (4).

$$E = mC_p\Delta T \quad (4)$$

(E: Energy; m: milk mass; C_p : Heat capacity; ΔT : the difference between 4°C and the optimal temperature)

2.4.5.3. Milk coagulation

For milk coagulation, only the material of the vat (stainless steel, copper, or wood, depending on the specifications) was taken into account. The calculation of the material weight attributable to each kg of cheese produced was estimated using Equation (3).

2.4.5.4. Curd slicing

Since the focus here was on artisanal cheeses, it was assumed that curd slicing was performed manually. Therefore, no flows were taken into account for this step.

2.4.5.5. Cooking and stirring

This step occurs in the production of cooked pressed cheeses. The flows included for this step were the electricity needed for heating, and were estimated according to Equation (1)

from the use time (available in cheese specification or estimated by experts acknowledged in the Acknowledgment section) and the equipment power found in technical datasheets (available in data_PDOcheeses_datasheets). Since milk stirring is performed manually for artisanal cheeses, no flows were calculated for this action.

2.4.6. Molding and draining

The molding step is mainly done by hand for the production of artisanal French PDO cheeses. Based on our discussions with experts, we modelled a scenario in which draining occurs spontaneously during and after molding through small holes in the mold. For this reason, no flows were taken into account for this step.

2.4.7. Pressing

This step is indispensable for pressed cheeses. Following the recommendations of experts, we modelled a process of manual pressing, performed by hand with a traditional press. No flows were therefore taken into account for this step.

2.4.8. Needling

Piercing is necessary to produce blue-veined cheese. This process consists of inserting needles into the cheese to form grooves where mold can develop. The assumption was made that piercing was done manually for all blue-veined cheese studied, and therefore no flows were taken into account for this step.

2.4.9. Cheese transport (for alternative scenario)

For the alternative scenario, we included a transportation step in which cheeses were transported from the cheesemaking facility to an off-site ripening room. As with milk transport, we assumed the longest distance allowed in the specifications for each cheese, as well as a land-based and refrigerated transport. All the distances are available in data_PDOcheeses_distances.

2.4.10. Cheese ripening

The first scenario is one in which cheeses are produced and ripened in the same location. For this scenario the average daily electrical consumption of two experimental artisanal ripening rooms (respectively 16 m² and 12.5 m³) were used to estimate the inventory data. The electrical consumption was estimated by multiplying the power of the equipment by the duration of use.

For the alternative scenario in which the cheese is transported to an off-site facility and then ripened in a large shared room, an industrial ripening room of 340 m³ was used [1]. The electrical consumption used for this scenario was the average of three measurements of daily electricity consumption with continuous ventilation, per kg of cheese. For both scenarios the estimated energy consumption included the equipment needed to maintain the temperature in the ripening room.

Shelving/support materials (steel or wood, depending on the cheese) were also included, using a time allocation.

2.4.11. Equipment cleaning

The amount of water and detergent required to clean the various items of equipment used during cheese production was estimated using the "Reference Document on Best Available Techniques" [2].

2.4.12. Co-products

Cheese production yields cream and whey as co-products. Cream is only produced for cheeses that are made using a skimming step, while whey is produced for all cheeses, mainly during the draining and pressing step. The masses of cream and whey produced were estimated for each cheese as follows.

2.4.12.1. Cheeses produced without a skimming step

The production of cheeses without a skimming step leads to the generation of only one co-product: whey. The mass of whey produced can be calculated as shown in Equation (5).

$$\text{Whey mass} = \text{milk mass} * (1 - \% \text{Cheese yields}) * (1 - \frac{\% \text{ whey loss}}{100}) \quad (5)$$

The cheese yields were estimated using [4], and the whey losses were estimated by experts.

2.4.12.2. Cheeses produced with a skimming step

To estimate the mass of cream produced, Equation (6) was used. We hypothesized that the cream produced was 40% fat.

$$\text{Mass of cream produced} = \frac{\text{fatty matter mass in initial milk} - \text{fatty matter mass in milk after skimming}}{0.4} \quad (6)$$

In order to determine the mass of whey produced during the draining phase, the milk mass after skimming must first be determined using Equation (7).

$$\text{Milk mass after skimming} = \text{Initial milk mass} - \text{Mass of cream produced} \quad (7)$$

Then, equation (5) can be used with the milk mass remaining after skimming to estimate the mass of whey produced.

2.4.12.3. Allocations

Several allocations were used in the calculations in the study.

2.4.12.3.1. Time allocations

Time allocations were used for equipment materials. The assumption was made that all metal and wood materials last for 30 years. The allocation factor used is presented in Equation (8).

$$\text{Allocation factor} = \frac{\text{Use duration (hours)}}{\text{Life time (hours)}} \quad (8)$$

2.4.12.3.2. Dry basis allocation

A dry basis allocation (as recommended by PEF methodology [5]) was used to identify the impacts attributable to the cheese and those associated with the generated co-products. The equation used is presented as Equation (9).

$$AF_i = \frac{DM_i * Q_i}{\sum_{i=1}^n (DM_i * Q_i)} \quad (9)$$

(AF_i : Allocation factor ; DM_i : Dry matter content (g/kg) ; Q_i : Mass of the product i (kg))

In this way, a dry basis allocation factor was calculated for cream and whey and used as follows:

For processing involving skimming:

Steps before skimming were allocated to cheese, cream, and whey.

Steps between skimming and draining were assigned to cheese and whey.

Steps after draining were attributed to cheese only.

For processing without skimming:

Steps occurring before draining were allocated to cheese and whey

Steps occurring after draining were allocated to cheese only.

The dry basis allocation factors calculated for all 44 cheeses are presented in the associated dataset.

Characterization

The characterization method "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set" (Fazio et al., 2018) was used in SimaPro (9.1.1.7) software to calculate the LCIA of the cheeses.

Ethics Statement

This work did not involve human subjects or laboratory animals, and therefore did not encounter any ethical issues.

Acknowledgements

This work was supported by the French National Research Agency through the DataSusFood project (grant number ANR-19-DATA-0016). The authors would also like to thank Marie-Noëlle Leclercq-Perlat, Bruno Perret, and Gilles Garric for their useful expertise and Lindsay Higgins from English services for scientists for professional revision of the English.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships which have, or could be perceived to have, influenced the work reported in this article.

CRediT authorship contribution statement

Adeline Cortesi: Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft. Laure Dijoux: Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – review & editing. Gwenola Yannou-Le Bris: Methodology, Formal analysis, Writing – review & editing. Caroline Pénicaud: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing – review & editing, Project administration, Funding acquisition, Supervision

References

- [1] G. Corrieu, B. Perret, A. Kakouri, D. Pappas, J. Samelis. Positive effects of sequential air ventilation on cooked hard Gravier cheese ripening in an industrial ripening room. *Journal of Food Engineering* 222 (2018), 162-168. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.11.021>
- [2] European commission. Integrated pollution prevention and control. Reference document on best available techniques in the Food, Drinks and Milk Industries. 2006.
- [3] ISO 14040:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Second edition, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006
- [4] ENILBIO Poligny. Evaluation de la performance matière en transformation fromagère. <https://www.enil.fr/docs/r&d/GUIDE-METHODOLOGIQUE-Evaluation-de-la-performance-matiere.pdf>, 2014 (accessed 26 February 2022)
- [5] EDA (European Dairy Association). Product Environmental Footprint Category Rules for Dairy Products. https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgrp/pdf/PEFCR-DairyProducts_2018-04-25_V1.pdf, 2018 (accessed 26 February 2022)

ANNEXE 3 : DATA PAPER ASSOCIE A L'ARTICLE 3

Data related to the Life Cycle Assessment of pizzas produced in different contexts and with real-world variability in consumer practices

Adeline Cortesi¹, Marine Colpaert¹, Anne Saint-Eve¹, Bastien Maurice¹, Gwenola Yannou-Le Bris¹, Isabelle Souchon², Caroline Pénicaud^{1,*}

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

²Avignon Université, INRAE, UMR SQPOV, 84000, Avignon, France

Abstract

Human food consumption is responsible for significant environmental impacts, which in recent years have been the focus of an increasing amount of research. One of the major results of these efforts has been an appreciation for the ways in which impacts can differ among products. To date, though, relatively little is known about possible differences in the environmental performance of a single food product that is made or produced in different contexts. Furthermore, the influence of consumer practices, such as cooking time or cleaning method, has not yet been investigated. The goals of the study were therefore i) to compare the environmental impacts of a single food product—in this case, pizza—that is produced in different contexts (industrial, homemade, and assembled at home) and ii) to investigate the influence of real-world consumer practices on these impacts. Two study models were used: a ham-and-cheese pizza and a mixed-cheese pizza. The functional units examined were one pizza and 1 kg of ready-to-eat pizza. The system perimeter extended from the agricultural production of ingredients to the consumption of the pizza at home. All inventory data related to the steps occurring before purchase (including storage at the supermarket) came from databases or the literature, while inventory data related to the steps occurring after the sale were obtained from questionnaires answered by 69 consumers who prepared and consumed the six pizzas (two recipes x three methods of preparation) at home. Background data were selected in the AGRIBALYSE 3.0 and Ecoinvent 3.6 databases. The environmental impacts of the six pizzas were calculated by Life Cycle Assessment (LCA) using the characterization method "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set" in SimaPro software. To compare the environmental impacts of the six pizzas, 69 LCA were performed for each; to compensate for missing data from incomplete questionnaires, we performed random draws from the available data to generate the life cycle inventory for each assessment. The data obtained in this study can be used to make recommendations to consumers regarding more environmentally friendly food choices and practices.

Keywords

Life cycle assessment (LCA), food, sustainability, environmental impacts

Specifications Table

Subject	Environmental Engineering
Specific subject area	Environmental assessment in the food industry
Type of data	Table
How data were acquired	Life cycle inventory (LCI) data were obtained from the scientific literature or generated in this study by i) direct measurements of product/material weight (balance) and ii) the answers of 69 consumers to questionnaires related to the preparation and consumption of the six studied pizzas. The environmental impacts of the pizzas were calculated by LCA using the "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set" in SimaPro software. Data from the AGRIBALYSE 3.0 and EcolInvent 3.6 databases were used as background data.
Data format	Raw Analyzed
Parameters for data collection	Three ham-and-cheese pizzas (one industrial, one assembled at home, one homemade) and three mixed-cheese pizzas (one industrial, one assembled at home, one homemade) prepared and consumed by 69 consumers.
Description of data collection	For the industrial pizzas, the mass of each ingredient was estimated based on the ingredient list and the nutritional values on the packaging. Assembled and homemade pizzas were formulated to be as similar as possible to the industrial versions in terms of nutritional and sensorial characteristics. The mass of the ingredients of the assembled and homemade pizzas was determined using a balance. The masses of all packaging materials were also weighed on a balance. Other life cycle inventory data related to the steps occurring before purchase (ingredient production, ingredient transformation, transport, distribution, and retailing) come from the database AGRIBALYSE 3.0 and from a previous study [1], and were adapted to the weights of our pizzas, ingredients, and packaging. Inventory data related to the steps occurring after purchase come from questionnaires answered by 69 consumers who prepared and consumed the six pizzas at home. The answers used for the data inventory describe the following: Transport between the supermarket and the home: distance between the

	consumer's home and supermarket and the type of vehicle used. Home storage: model and brand of fridge (in order to determine its electricity consumption), how full it was (percentage), and storage time. Dough making: equipment used and use time (for electrical equipment) Tomato sauce making: type of cooking surface (electric or gas) and cooking time. Pizza baking: pre-heating + cooking time. Dish cleaning: cleaning method (handwashing, dishwasher, or both), how full the dishwasher was. Leftovers: mass of leftovers, storage time, reheating time and equipment used (oven or microwave), end of life (consumed or thrown away).
Data source location	Inventory data from France were selected in the Agribalyse 3.0 database for agricultural products. Data from France were selected in the Ecoinvent 3.6 database when possible and complemented by European and global data when necessary. All the inventory and calculated data used in this study were stored in the INRAE research center in Thiverval-Grignon (FR) until September 2022 and will be stored in Palaiseau (FR) after September 2022.
Data accessibility	Repository name: Data INRAE Direct URL to data: https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/privateurl.xhtml?token=bedc372b-05b3-409e-816b-f7c3c0256920
Related research article	To be added

Value of the Data

The article presents LCI data related to the home preparation of pizza collected through questionnaires answered by 69 participants.

The article presents LCIA (Life Cycle Impact Assessment) data for pizzas produced in three different production scenarios: industrial, assembled at home, and homemade.

These data can be used by LCA experts to describe real-world consumer practices in the home with regard to industrial, assembled, and homemade pizzas.

These data can also be used to support messaging about good home practices for reducing the environmental impacts of food preparation and consumption.

1. Data description

The dataset contains files related to the LCIs and LCIAs of two pizzas produced in three different contexts, in which real-world variability in consumer practices is taken into account.

It also contains the three questionnaires used during the study.

1. dataset_Questionnaire 1: Questionnaire completed by participants before the study began. It includes questions related to model and brand of different type of household equipment and consumers habits.

2. dataset_Questionnaire 2: Questionnaire completed by participants after the preparation and consumption of each pizza. It includes questions related to pizza preparation (e.g. pizza baking time), pizza consumption, and leftovers management.

3. dataset_Questionnaire 3: Questionnaire completed by participants at the end of the study. It includes question related to the consumer preferences and perceptions of the different pizzas prepared.

4. dataset_pizzas_recipes: Recipes of the six pizzas studied.

5. dataset_pizzas_dough recipes: Recipes of the dough for each pizza, names of the data used in the associated database.

6. dataset_pizzas_tomato sauce recipes: Recipes of the tomato sauce for each pizza, types of data used and associated database.

7. dataset_pizzas_toppings: Data used to model the pizza toppings.

8. dataset_pizzas_transport: Data related to the types of cars used by study participants and the distances between their homes and the supermarket. The types of data used and associated database are also included.

9. dataset_pizzas_home storage: Data related to the electrical consumption of the consumers' fridges (for one hour), the volume filled (percentage), and the volume allocations used. The storage time is included as well as the relative frequencies of the different types of refrigerators in the study (number of consumers using each type of fridge/number of answers).

10. dataset_pizzas_dough making: Data used to estimate the electrical consumption of dough making for all pizzas: power of household equipment reported by consumers and equipment use time for each pizza.

11. dataset_pizzas_tomato sauce making: Data used to estimate the energy consumption of tomato sauce making for all pizzas: power of household equipment reported by consumers (electrical and gas cooktops) and equipment use time for each pizza.

12. dataset_pizzas_packaging: Mass of the different packaging materials, types of data used (for both packaging and packaging waste) and associated databases.

13. dataset_pizzas_cleaning: Cleaning method used and associated proportions; number of dish units cleaned using each method for each pizza; for the dishwashers, the volume filled

(percentage) and program used as reported by consumers, used to estimate water and electricity consumption; water and electricity consumption related to hand washing;

14. dataset_pizzas_home cooking: Data related to the home cooking step (oven power and use time). The data used to model electricity consumption are also described.

15. dataset_pizzas_leftovers: Data related to the management of leftovers: mass of leftovers, fresh storage time, cooking time, and equipment used for each pizza. The types of data used and associated database are also included.

16. dataset_pizzas_LCIA baseline scenario: Baseline LCA of the six pizzas calculated using the baseline data reported by consumers.

17. dataset_pizzas_LCIA random UF 1 pizza: 69 LCA performed on each of the six pizzas with a FU of one pizza.

18. dataset_pizzas_LCIA random UF 1 kg: 69 LCA performed on each of the six pizzas with a FU of 1 kg of pizza.

2. Experimental design, materials, and methods

For this study, we followed the steps of the LCA methodology [2].

2.1. Goal

The goals of this study were i) to understand the influence of real-world consumer practices on the environmental impacts of a food product, and ii) to compare the environmental impacts of a product prepared in different contexts (industrial, assembled at home, and homemade). We assessed all of the steps from primary ingredient production to consumption, and identified the main hotspots.

2.2. System definition

Two study models were used: a ham-and-cheese pizza and a mixed-cheese pizza. Both were prepared in three different ways: industrial, assembled at home, and homemade. In total, six pizzas were studied: an industrial ham-and-cheese pizza (Ind_H/C), a ham-and-cheese pizza assembled at home (Ass_H/C), a homemade ham-and-cheese pizza (Hom_H/C), an industrial mixed-cheese pizza (Ind_C), a mixed-cheese pizza assembled at home (Ass_C), and a homemade mixed-cheese pizza (Hom_C).

2.2.1. Pizza selection and formulation

2.2.1.1. Industrial pizza selection

Two industrial pizzas from the French retail market were selected: one ham-and-cheese pizza (Nutri-Score B) and one mixed-cheese pizza (NutriScore D). These two types of pizza were selected because they are the two most popular categories of pizza in France and because we

wanted the pizzas to have different nutritional qualities. The assembled and homemade pizzas were then formulated to be similar to the industrial products from a sensory and nutritional point of view (i.e., nutritional composition was identical per 100 g of pizza).

2.2.1.2. Recipe estimation of industrial pizzas

In order to formulate the assembled and homemade pizzas, the first step was to estimate the recipe of the industrial pizzas. To do so, the ingredients and the nutritional composition of the two industrial pizzas were collected from their packaging and entered into an INRAE internal software program called Anatole [3], which provided an estimate of the masses of each ingredient.

2.2.1.3. Formulation of the assembled pizza

The pizzas to be assembled at home were made of an industrial dough and an industrial cooked tomato sauce. The first step for the formulation of these pizzas was to identify the industrial dough, tomato sauces, and toppings available in the French retail market. Based on this, the recipe of the assembled pizza was designed to be as close as possible to the estimated recipe of the industrial product in terms of nutritional composition (within the tolerances established by EC regulations n°1924/2006 and 1925/2006). Formulation trials were then carried out in which the recipes of the assembled pizzas were modified in order to produce pizzas that were as close to the industrial versions as possible in terms of nutritional and sensory characteristics (global visual, taste, and texture). The same protocol was used for both pizzas Ass_H/C and Ass_C.

2.2.1.4. Homemade pizza formulation

The homemade pizzas were made using a homemade dough and tomato sauce. The first step for the formulation of the homemade pizzas was to identify the ingredients needed to make the dough and the tomato sauce, as well as the toppings available in the French retail market. Based on this, the recipe of the homemade pizza was designed to be as close as possible to the estimated recipe of the industrial product in terms of nutritional composition and sensory characteristics. Formulation trials were then carried out as described above for the assembled pizzas.

2.2.1.5. System perimeter

The system perimeter included all steps from the agricultural production of ingredients to pizza consumption and waste management. For the industrial pizzas, pizzas were bought at the supermarket and baked at the consumer's home. For the assembled pizzas, the industrial dough and tomato sauce, as well as all the toppings, were bought at the supermarket and assembled and baked at the consumer's home. For the homemade pizzas, the ingredients needed to make the dough and the tomato sauce, as well as all the toppings, were bought at the supermarket. The dough and tomato sauce were prepared by the consumer at home and then used to make the homemade pizza.

2.3. Functional Unit

A functional unit of one ready-to-eat pizza was chosen. For the sake of comparison, LCA were also performed for a FU of 1 kg of ready-to-eat pizza.

2.4. Inventory and data collection

A panel of 69 consumers was recruited to perform the study. The inclusion criteria were as follows: age between 20 and 70 years old, not working in the food industry, not following a particular diet, without any food allergy or intolerance, without any disease that could affect the senses, not pregnant or breastfeeding, in the habit of consuming pizza at least once a month, and able to prepare pizzas at home (in possession of an oven, a refrigerator, and a scale). The study lasted three weeks in total. Each week, each consumer had to prepare and consume two different pizzas. In order to avoid bias related to the consumption order, the following rules were applied: each week, all consumers prepared and consumed one ham-and-cheese and one mixed-cheese pizza; half of the consumers prepared and consumed the ham-and-cheese pizza first and the other half prepared and consumed the mixed-cheese pizza first; a consumer was not allowed to consume two pizzas from the same production method (industrial, assembled, or homemade) within the same week. The consumers received all dry ingredients the first week of the study, and the fresh ingredients and industrial pizzas were delivered on a weekly basis.

The life cycle inventory of the steps between purchase at the supermarket and consumption was estimated based on participants' answers to online questionnaires.

2.4.1. Ingredients

The mass of each ingredient in the assembled and homemade pizzas was weighed on a balance (XT 6200C, accuracy = 0.01 g) during the formulation trials. This final mass of each ingredient was given to consumers as part of the recipes so that all 69 consumers could make the same pizzas. Background data from the AGRIBALYSE 3.0 database were used to model the agricultural/food products, adapted to the correct weights. For the emmental and blue cheeses, AGRIBALYSE 3.0 was used to model the impacts of milk, and data from the literature [4] were used to model the cheese-making process.

2.4.2. Packaging

2.4.2.1. Packaging weights

All packaging materials were weighed using a PRECISA balance (XT 6200C, accuracy = 0.01 g). These data, as well as the data used to model the environmental impacts, are available in the file dataset_pizzas_packagings. The data used to model the packaging waste are also described in this dataset.

2.4.2.2. Packaging transport

As part of our analysis, we took into account the transportation of packaging materials from

the packaging manufacturer to the factory where they were used. We modeled the hypothesis used by the AGRIBALYSE database, in which the transportation of packaging combines road, train, and boat transport as follows:

Road transport: 350 km for glass, 230 km for other materials.

Train transport: 39 km for glass, 280 km for other materials.

Boat transport: 87 km for glass, 360 km for other materials.

2.4.3. Distribution, retailing, and transport in between

The industrial pizzas and the ingredients for the homemade and assembled pizzas were transported to the wholesaler, stored, transported to the supermarket, and stored again until purchase. This transportation, as well as the heat, water, and electricity required to store the products, was taken into account in the LCA using the assumptions for the pizza data of the AGRIBALYSE 3.0 database, adapted to the weight of our products.

2.4.4. Dough making

The dough-making process was performed at an industrial facility for pizzas Ind_H/C, Ass_H/C, Ind_C, and Ass_C. The electrical consumption associated with this was obtained from [1] and was adapted to the dough weights of our pizzas. For pizzas Hom_H/C and Hom_C, dough making occurred at home, and the data for our model came from questionnaires answered by the 69 participants of the study. Three dough-making techniques were reported by the consumers: mixing by hand, using an electric mixer, and using a breadmaker. For dough making by hand, no resource flow was calculated. For the two other options, the electrical consumption was included, estimated using equation 1.

$$\text{Energy consumption (kWh)} = \text{Power of the equipment (kW)} * \text{use time (h)} \quad (1)$$

The power of the equipment used was reported by the consumers or estimated based on the user manuals of the equipment model reported by the consumers. The equipment use time was also reported by consumers. The related data are available in the file data_pizzas_dough making.

2.4.5. Tomato sauce making

Tomato sauce was prepared in industrial facilities for pizzas Ind_H/C, Ass_H/C, Ind_C, and Ass_C. To model this, we used the tomato sauce data from the AGRIBALYSE database: "Cooking, industrial, 1kg of cooked product/ FR U". For pizzas Hom_H/C and Hom_C, the tomato sauce was prepared at home, and the data used in the model came from questionnaires answered by the 69 participants of the study. Two cooking options were reported by the consumers: using electricity and using gas. The energy consumption was estimated using equation 1. The power of the equipment used was reported by participants or estimated based on the user manuals of the equipment model reported by the participants. The equipment use

time was also reported in the questionnaire. The related data are available in the file data_pizzas_tomato sauce making.

2.4.6. Industrial pizza making

The inventory data used for the industrial processing of pizzas (for industrial pizzas) came from [1]. These inventory data were adapted to the appropriate type of pizza and ingredient weights used in this study.

2.4.7. Transportation from the supermarket to the home

The following information was requested in the questionnaire:

- Distance from the consumer's home to the supermarket
- Most frequent means of transportation for going to the supermarket
- Frequency of shopping

Most consumers stated that they went grocery shopping once a week. We thus used the hypothesis that this weekly trip to the supermarket allowed the purchase of all of the food items needed to prepare 14 meals (2 meals per day). One pizza represented one meal, or 1/14 of the groceries bought weekly. Thus, an allocation of 1/14 was used to determine the transportation that was attributable to the pizza (or the ingredients needed to make the pizza in the case of pizzas Ass_H/C, Hom_H/C, Ass_C and Hom_C). The model took into account the distance between the consumer's home and the supermarket, as well as the type of vehicle used. The Ecoinvent data chosen for the model, as well as the weighting used and the distances, are available in the file dataset_pizzas_transport. Due to a lack of available data, hybrids and bioethanol cars were assumed to be gasoline-powered and motorcycles were assumed to be scooters. A round trip was considered.

2.4.8. Home storage

To model the home refrigeration of pizzas and fresh ingredients, we considered two types of data: data which were the same for all pizzas (electrical consumption of the fridge and reported capacity used) and data which were not the same for all pizzas (volume allocation and storage time). Volume allocations were calculated by estimating the volume occupied by each pizza out of the volume available in the fridge. The annual electrical consumption of each fridge was calculated using technical sheets found online (using the model and brand indicated by the consumers in the questionnaires). Then, the electrical consumption attributable to each pizza was calculated using equation 2.

$$\text{Electrical consumption (kWh)} = \frac{\text{fridge annual electrical consumption (kWh)}}{365 \times 24} \times \text{storage time(h)} \times \frac{\text{Volume allocation(\%)}}{\text{filling rate (\%)}} \quad (1)$$

Data on the electrical consumption of consumers' fridges are available in the file dataset_pizzas_home storage together with the storage times.

2.4.9. Home cooking

The brand and model of the electric oven of each consumer, as well as the time used for preheating and baking, were collected via the questionnaires. The brand and model of the oven were used to determine its power. The electrical consumption of the cooking step was then estimated using equation 1. Oven power and use times are available in dataset_pizzas_home cooking.

2.4.10. Cleaning

The participants were asked to list the dishes they cleaned after preparing, cooking, and consuming the pizzas, as well as the methods they used. Three options for cleaning were reported: hand dishwashing only, dishwasher only, and both. Some consumers reported not cleaning anything. The water consumption, waste water output, and energy consumption were taken into account for the LCA.

For handwashing, the water consumption to clean one dish unit was estimated using online data [5] and multiplied by the number of dish units cleaned. To estimate energy consumption, we used the hypothesis that cold water was 10°C and that the water heater was able to heat the water up to 55°C. The energy consumption was then calculated using equation (3).

$$\text{Energy consumption (kWh)} = \text{water mass(kg)} \times C_p \text{ water} \times (T^{\circ}\text{C hot water} - T^{\circ}\text{C cold water})$$

(3)

For handwashing, the energy consumption could be electricity or gas depending on the type of water heater reported by the consumer.

For dishwashers, the participants were asked to report the most common dishwasher program used as well as the model and brand of the dishwasher. The water and electricity consumption were found in the manufacturers' data sheets.

Weighting was applied based on the number of participants using each cleaning method for each of the six pizzas. The water inputs and outputs, energy consumption, and the number of dish units cleaned, as well as the weightings used, are presented in the file dataset_pizzas_cleaning. One dish unit represented the dishes used by one person for one meal.

2.4.11. Leftovers

After consuming the pizza, consumers indicated whether they had any leftover pizza, uneaten crusts, or discarded ingredients. If so, they weighed them and reported what they did with them: threw them away, gave them away, or kept them in the refrigerator to consume later. When leftovers were stored in the refrigerator, consumers were asked to report the following information: storage time, final use (eaten, given or thrown away), and reheating details, if applicable (equipment used (oven or microwave) and heating time). Volume allocations were

used to estimate the electrical consumption of the fridge that could be attributable to the leftovers. Electrical consumption was calculated in a similar way as that of pizza storage (equation 2) and pizza cooking (equation 1). The related data are available in dataset_pizzas_leftovers.

2.5. Characterization

The LCA were conducted in SimaPro 9.1.0.11 software using the characterization method "EF 3.0 Method (adapted) V1.00 / EF 3.0 normalization and weighting set". LCA were performed for two different FUs (FU = 1 pizza and FU = 1 kg of pizza) in order to investigate how the choice of FU influenced the conclusions. To characterize environmental hotspots, a baseline LCA was performed for each of the six pizzas using average data calculated from consumers' answers. When different practices were used by a subset of the study panel (i.e. using electrical equipment for dough making or mixing the dough by hand), weights were attributed to each practice that represented the proportion of participants using it. Furthermore, for each pizza, 69 LCA were performed to represent the 69 consumers.

To compensate for missing inventory data from incomplete questionnaires, for each of the 69 LCA random draws were made of the available data from consumers. LCIA results are available in dataset_pizzas_LCIA.

Ethics Statement

This work did not involve human subjects or laboratory animals, and therefore did not encounter any ethical issues.

Acknowledgments

This work was supported by the French National Research Agency through the ANR-IC-Qualiment TransfoQuaPe project and the DataSusFood project (grant number ANR-19-DATA-0016). The authors would also like to thank David Forest for his help during the experiment and Lindsay Higgins from English Services for Scientists for professional revision of the English.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships which have, or could be perceived to have, influenced the work reported in this article.

CRedit authorship contribution statement

Adeline Cortesi: Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft. Marine Colpaert: Methodology, Formal analysis, Investigation, Writing – review & editing. Anne Saint-Eve: Conceptualization, Methodology, Resources, Funding acquisition, Writing – review & editing. Bastien Maurice: Methodology, Formal analysis, Resources, Writing – review & editing. Gwenola Yannou-Le Bris: Methodology, Formal analysis, Writing – review & editing. Isabelle Souchon: Conceptualization, Methodology, Funding acquisition, Writing – review & editing. Caroline Pénicaud: Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Writing – review & editing, Supervision.

References

- [1] Cortesi, A., Pénicaud, C., Saint-Eve, A., Soler, L.G., Souchon, I., Life cycle inventory and assessment data for quantifying the environmental impacts of a wide range of food products belonging to the same food category: a case study of 80 pizzas representatives of the French retail market. Data in brief 41 (2022), 107950. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107950>
- [2] ISO 14040:2006, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, Second edition, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2006
- [3] Leroy, P., Guillemin, H., Guinet, N., Maurice, B., Perret, B., Allais, O., Souchon, I. Anatole (Analyse des Taux Ordonnés des Ingrédients Dans Les Recettes Industrielles) [Online]. Available <https://odalim.inrae.fr/fr/tools/7-anatole-v1> (accessed on 25 October 2022).
- [4] Cortesi, A., Dijoux, L., Yannou-Le Bris, G., Pénicaud, C., 2022. Data related to the life cycle assessment of 44 artisanally produced French protected designation of origin (PDO) cheeses. Data in Brief 43 (2022), 108403. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.108403>
- [5] <https://www.18h39.fr/articles/quest-ce-qui-est-le-plus-ecolo-faire-la-vaisselle-a-la-main-ou-avec-un-lave-vaisselle.html> (accessed on 14 November 2022).

ANNEXE 4 : ANNEXE ASSOCIEE A L'ARTICLE 1

In total, 80 of 392 pizzas from the French retail market available in the OQALI database (Données Oqali – extraction du 02-07-2015) were selected for this study. The product label on the front of the packaging was used to calculate the recipe of each pizza. From the list of ingredients and the table of the nutritional data (energy, protein, fat, saturated fatty acids, carbohydrates, sugar, and salt), it was possible to estimate the missing proportion of the main ingredients (representing more than 95%, by mass, of the recipe) for each pizza. This was accomplished using the CIQUAL data base (ANSES - Table de composition nutritionnelle des aliments Ciqua) to obtain the nutritional value for each ingredient of the ingredients list and the mass balance of the nutrients was calculated to determine the quantity of each ingredient. The resulting estimated recipes were then used to calculate the ratio between vegetal and animal content of the pizzas (in total mass, protein mass, and kcal) and the ratio between the filling and dough. From the recipe and nutritional data, it was possible to calculate the nutritional indices, such as the French nutritional indicator "NutriScore", which is calculated using the FSA (FSA-NPS DI: British Food Standards Agency-Nutrient Profiling System Dietary Index) (Julia et al., 2014). This indicator takes into account nutrients to promote the consumption of protein, fiber, fruits, vegetables, and legumes and to avoid the overconsumption of calories, saturated fatty acids, sugar, and sodium.

Then, a number of variables (composition (different ratios), nutritional content, nutritional index, and economic value) were used to multi-dimensionally characterize the pizzas of the French retail market. Hierarchical cluster analysis was used to categorize the 392 pizzas into 16 groups according to their differences and similarities for the selected variables (composition, nutritional content, nutritional index, and economic value) using XLStat software. Hierarchical cluster analysis is a statistical method that allows the grouping of several individuals of the same sample according to different characteristics chosen by the user.

Within the 16 clusters, we applied various rules to choose five products per cluster to have the eight families represented in proportions close to the reality of the market, as well as that of both fresh and frozen pizzas, and pizzas still on the market that could be bought easily (a sensory study was conducted in parallel). This selection resulted in our current sample of 80 pizzas (Figure A).

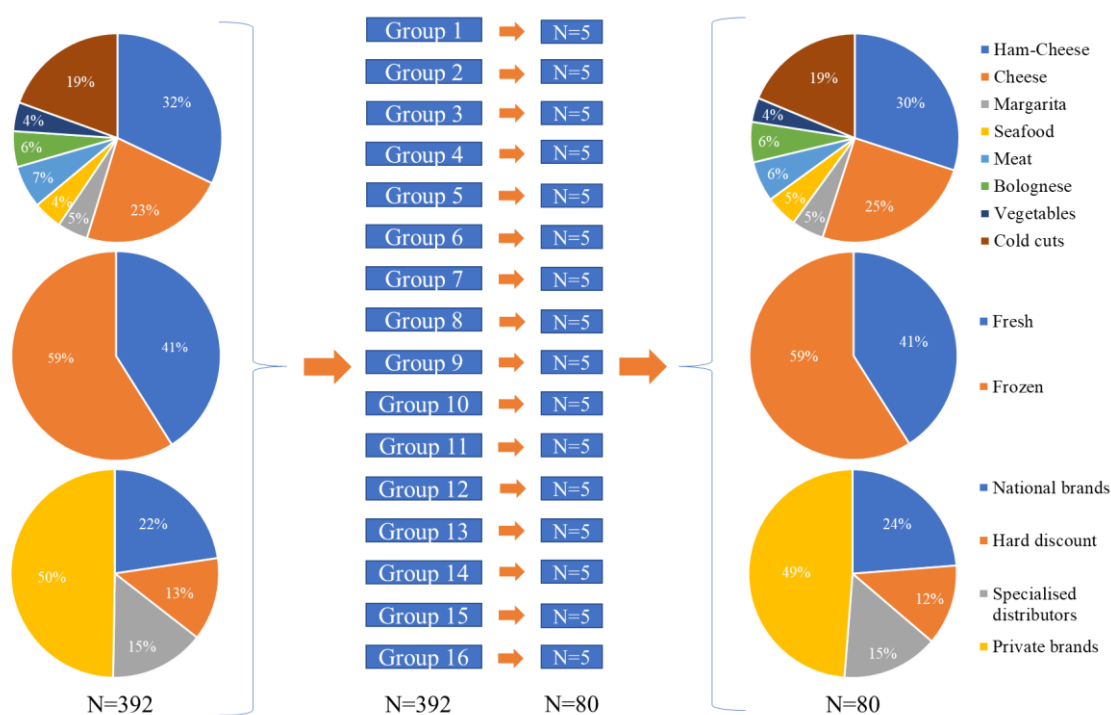


Figure A: Selection of the sample of 80 pizzas from the 392 available on the French retail market

The selected sample (n = 80) is representative of the French retail market (n = 392) in terms of families, sectors, and distributors (Figure A.1).

References

Julia, C., Kesse-Guyot, E., Touvier, M., Méjean, C., Fezeu, L., Hercberg, S., 2014. Application of the British Food Standards Agency nutrient profiling system in a French food composition database. *Br. J. Nutr.* 112, 1699–1705. <https://doi.org/10.1017/S0007114514002761>

ANNEXE 5 : SEMI-STRUCTURED INTERVIEW GUIDE (ARTICLE 5)

Original (French) version:

Pouvez-vous m'indiquer le poste que vous occupez ainsi que le ou les produits sur lesquels vous travaillez.

- (1) Pouvez-vous présenter votre poste, votre entreprise et les produits sur lesquels vous travaillez ?
- (2) Quels sont pour vous les principaux critères de qualité à prendre en compte pour une pizza ?
- (3) Quels indicateurs utilisez-vous pour mesurer ces critères de qualité ?
- (4) Votre entreprise s'intéresse-t-elle à des critères de qualité en lien avec l'environnement ? (Question posée uniquement si l'environnement n'a pas été cité dans la question 2)
- (5) Pensez-vous qu'il serait intéressant pour votre entreprise de considérer d'autres critères de qualité de produits que ceux étudiés à l'heure actuelle ?
- (6) Pouvez-vous hiérarchiser les critères mentionnés précédemment ? Lesquels vous apparaissent comme étant les plus importants et pourquoi ?
- (7) Avez-vous des remarques, questions, suggestions au terme de cet entretien ?

Translated (English) version:

- (1) Can you introduce me the position you hold, your company and the product(s) you work on.
- (2) What do you consider to be the main quality criteria for a pizza?
- (3) What indicators do you use to measure these quality criteria?
- (4) Does your company address quality criteria related to the environment? (Only asked if the environment was not mentioned in question 2)
- (5) Do you think it would be interesting for your company to consider other product quality criteria than those currently studied?
- (6) Can you prioritize the criteria mentioned above? Which ones do you consider to be the most important and why?
- (7) Do you have any comments, questions or suggestions at the end of this interview?

ANNEXE 6 : INDICATORS MENTIONED DURING SEMI-STRUCTURED INTERVIEWS (ARTICLE 5)

Nutritional quality	Saturated fatty acids content, fibres content, carbohydrates content, energy (kcal) content; fat content; NutriScore; salt content; sugar content; additives ; gluten free ; proteins.
Sensorial quality	Dough color; toppings covering; toppings disposition; dough high; visual aspect before cooking; visual aspect after cooking; sauce disposition; global taste; sauce spiciness, non-acid sauce; sauce taste; cheese; crispiness, cheese fondant, cheese stringiness.
Environmental quality	Packaging reduction; use of a less polluting packaging ink; replacement of plastic packaging by recyclable material; waste recycling.

ANNEXE 7 : DECISION RULES (ARTICLE 5)

DEXi

Final model.dxi 03/10/2022

Page 1

Tables

Environmental quality 33%	Nutritional quality 33%	Sensory quality 33%	Pizza quality
1 Very bad	Very bad	<=Average	Very bad
2 Very bad	<=Bad	<=Bad	Very bad
3 Very bad	<=Average	Very bad	Very bad
4 <=Bad	Very bad	<=Bad	Very bad
5 <=Bad	<=Bad	Very bad	Very bad
6 <=Average	Very bad	Very bad	Very bad
7 Very bad	<=Bad	>=Good	Bad
8 Very bad	<=Average	Good	Bad
9 <=Bad	Very bad	>=Good	Bad
10 <=Bad	<=Bad	Good	Bad
11 <=Average	Very bad	Good	Bad
12 Very bad	Bad	>=Average	Bad
13 Very bad	Bad:Average	Average:Good	Bad
14 Very bad	Bad:Good	Average	Bad
15 <=Bad	Bad	Average:Good	Bad
16 <=Bad	Bad:Average	Average	Bad
17 <=Average	Bad	Average	Bad
18 Very bad	Average	Bad:Good	Bad
19 Very bad	Average:Good	Bad:Average	Bad
20 Very bad	>=Average	Bad	Bad
21 <=Bad	Average	Bad:Average	Bad
22 <=Bad	Average:Good	Bad	Bad
23 <=Average	Average	Bad	Bad
24 Very bad	Good	<=Average	Bad
25 Very bad	>=Good	<=Bad	Bad
26 <=Bad	Good	<=Bad	Bad
27 <=Bad	>=Good	Very bad	Bad
28 <=Average	Good	Very bad	Bad
29 Bad	Very bad	>=Average	Bad
30 Bad	<=Bad	Average:Good	Bad
31 Bad	<=Average	Average	Bad
32 Bad:Average	Very bad	Average:Good	Bad
33 Bad:Average	<=Bad	Average	Bad
34 >=Bad	Very bad	Average	Bad
35 Bad	Bad	Bad:Good	Bad
36 Bad	Bad:Average	Bad:Average	Bad
37 Bad	Bad:Good	Bad	Bad
38 Bad:Average	Bad	Bad:Average	Bad
39 Bad:Average	Bad:Average	Bad	Bad
40 >=Bad	Bad	Bad	Bad
41 Bad	Average	<=Average	Bad
42 Bad	Average:Good	<=Bad	Bad
43 Bad	>=Average	Very bad	Bad
44 Bad:Average	Average	<=Bad	Bad
45 Bad:Average	Average:Good	Very bad	Bad
46 >=Bad	Average	Very bad	Bad
47 Average	Very bad	Bad:Good	Bad
48 Average	<=Bad	Bad:Average	Bad
49 Average	<=Average	Bad	Bad
50 >=Average	Very bad	Bad:Average	Bad
51 >=Average	<=Bad	Bad	Bad
52 Average	Bad	<=Average	Bad
53 Average	Bad:Average	<=Bad	Bad
54 Average	Bad:Good	Very bad	Bad
55 >=Average	Bad	<=Bad	Bad
56 >=Average	Bad:Average	Very bad	Bad
57 Good	Very bad	<=Average	Bad
58 Good	<=Bad	<=Bad	Bad
59 Good	<=Average	Very bad	Bad
60 Very bad	Average:Good	Very good	Average
61 <=Bad	Average	Very good	Average
62 Very bad	Good	>=Good	Average

63	Very bad	>=Good	Good	Average
64	<=Bad	Good	Good	Average
65	Very bad	Very good	Average:Good	Average
66	<=Bad	Very good	Average	Average
67	Bad	Bad:Average	Very good	Average
68	Bad:Average	Bad	Very good	Average
69	Bad	Average	>=Good	Average
70	Bad	Average:Good	Good	Average
71	Bad:Average	Average	Good	Average
72	Bad	Good	Average:Good	Average
73	Bad	>=Good	Average	Average
74	Bad:Average	Good	Average	Average
75	Bad	Very good	Bad:Average	Average
76	Bad:Average	Very good	Bad	Average
77	Average	<=Bad	Very good	Average
78	>=Average	Very bad	Very good	Average
79	Average	Bad	>=Good	Average
80	Average	Bad:Average	Good	Average
81	>=Average	Bad	Good	Average
82	Average	Average	Average:Good	Average
83	Average	Average:Good	Average	Average
84	>=Average	Average	Average	Average
85	Average	Good	Bad:Average	Average
86	Average	>=Good	Bad	Average
87	>=Average	Good	Bad	Average
88	Average	Very good	<=Bad	Average
89	>=Average	Very good	Very bad	Average
90	Good	Very bad	>=Good	Average
91	Good	<=Bad	Good	Average
92	Good	Bad	Average:Good	Average
93	Good	Bad:Average	Average	Average
94	Good	Average	Bad:Average	Average
95	Good	Average:Good	Bad	Average
96	Good	Good	<=Bad	Average
97	Good	>=Good	Very bad	Average
98	<=Average	Very good	Very good	Good
99	Bad:Average	>=Good	Very good	Good
100	>=Bad	Good	Very good	Good
101	Bad:Average	Very good	>=Good	Good
102	Average	>=Average	Very good	Good
103	>=Average	Average:Good	Very good	Good
104	Average	>=Good	>=Good	Good
105	>=Average	Good	>=Good	Good
106	Average	Very good	>=Average	Good
107	>=Average	Very good	Average	Good
108	Good	Bad:Good	Very good	Good
109	Good	Average:Good	>=Good	Good
110	Good	Good	>=Average	Good
111	Good	>=Good	Average	Good
112	Good	Very good	Bad:Average	Good
113	Good	Very good	>=Good	Very good

	Ingredients	Packaging	Environmental quality
	67%	33%	
1	Bad	Bad	Very bad
2	Bad	>=Average	Bad
3	Average	Bad	Bad
4	Average	>=Average	Average
5	Good	Bad	Average
6	Good	>=Average	Good

	Plastic 71%	Carboard 29%	Packaging
1	Bad	*	Bad
2	<=Average	Bad	Bad
3	Average	>=Average	Average
4	Good	Bad	Average
5	Good	>=Average	Good

	Energy 20%	Nutrients & minerals 80%	Nutritional quality
1	<=Average	Very bad	Very bad
2	<=Good	Bad	Bad
3	Good	<=Bad	Bad
4	>=Good	Very bad	Bad
5	Very bad	Average:Good	Average
6	*	Average	Average
7	Very good	Bad:Average	Average
8	<=Bad	Very good	Good
9	Bad	>=Good	Good
10	>=Bad	Good	Good
11	>=Average	Very good	Very good

	Protein	Fiber	Saturated fatty acids	Sodium	Sugars	Nutrients & minerals
	13%	13%	25%	25%	25%	
1	Bad	Bad	Bad	Bad	<=Average	Very bad
2	Bad	Bad	Bad	<=Average	Bad	Very bad
3	Bad	Bad	<=Average	Bad	Bad	Very bad
4	Bad	*	Bad	Bad	Bad	Very bad
5	<=Average	<=Average	Bad	Bad	Bad	Very bad
6	*	Bad	Bad	Bad	Bad	Very bad
7	Bad	Bad	Bad	<=Average	Good	Bad
8	Bad	Bad	<=Average	Bad	Good	Bad
9	Bad	*	Bad	Bad	Good	Bad
10	<=Average	<=Average	Bad	Bad	Good	Bad
11	*	Bad	Bad	Bad	Good	Bad
12	Bad	Bad	Bad	Average	>=Average	Bad
13	Bad	Bad	Bad	>=Average	Average	Bad
14	Bad	Bad	<=Average	Average	Average	Bad
15	Bad	*	Bad	Average	Average	Bad
16	<=Average	<=Average	Bad	Average	Average	Bad
17	*	Bad	Bad	Average	Average	Bad
18	Bad	Bad	Bad	Good	<=Average	Bad
19	Bad	Bad	<=Average	Good	Bad	Bad
20	Bad	*	Bad	Good	Bad	Bad
21	<=Average	<=Average	Bad	Good	Bad	Bad
22	*	Bad	Bad	Good	Bad	Bad
23	Bad	Bad	Average	Bad	>=Average	Bad
24	Bad	Bad	Average	<=Average	Average	Bad
25	Bad	Bad	>=Average	Bad	Average	Bad
26	Bad	*	Average	Bad	Average	Bad
27	<=Average	<=Average	Average	Bad	Average	Bad
28	*	Bad	Average	Bad	Average	Bad
29	Bad	Bad	Average	Average	<=Average	Bad
30	Bad	Bad	Average	>=Average	Bad	Bad
31	Bad	Bad	>=Average	Average	Bad	Bad
32	Bad	*	Average	Average	Bad	Bad
33	<=Average	<=Average	Average	Average	Bad	Bad
34	*	Bad	Average	Average	Bad	Bad
35	Bad	Bad	Good	Bad	<=Average	Bad
36	Bad	Bad	Good	<=Average	Bad	Bad
37	Bad	*	Good	Bad	Bad	Bad
38	<=Average	<=Average	Good	Bad	Bad	Bad
39	*	Bad	Good	Bad	Bad	Bad
40	Bad	>=Average	Bad	Bad	>=Average	Bad
41	Bad	>=Average	Bad	<=Average	Average	Bad
42	Bad	>=Average	<=Average	Bad	Average	Bad
43	<=Average	Average	Bad	Bad	>=Average	Bad
44	<=Average	Average	Bad	<=Average	Average	Bad
45	<=Average	Average	<=Average	Bad	Average	Bad
46	*	>=Average	Bad	Bad	Average	Bad
47	Bad	>=Average	Bad	Average	<=Average	Bad
48	Bad	>=Average	Bad	>=Average	Bad	Bad
49	Bad	>=Average	<=Average	Average	Bad	Bad
50	<=Average	Average	Bad	Average	<=Average	Bad
51	<=Average	Average	Bad	>=Average	Bad	Bad
52	<=Average	Average	<=Average	Average	Bad	Bad
53	*	>=Average	Bad	Average	Bad	Bad
54	Bad	>=Average	Average	Bad	<=Average	Bad
55	Bad	>=Average	Average	<=Average	Bad	Bad
56	Bad	>=Average	>=Average	Bad	Bad	Bad
57	<=Average	Average	Average	Bad	<=Average	Bad
58	<=Average	Average	Average	<=Average	Bad	Bad
59	<=Average	Average	>=Average	Bad	Bad	Bad
60	*	>=Average	Average	Bad	Bad	Bad
61	Average	<=Average	Bad	Bad	>=Average	Bad
62	Average	<=Average	Bad	<=Average	Average	Bad

63	Average	<=Average	<=Average	Bad	Average	Bad
64	>=Average	Bad	Bad	Bad	>=Average	Bad
65	>=Average	Bad	Bad	<=Average	Average	Bad
66	>=Average	Bad	<=Average	Bad	Average	Bad
67	>=Average	*	Bad	Bad	Average	Bad
68	Average	<=Average	Bad	Average	<=Average	Bad
69	Average	<=Average	Bad	>=Average	Bad	Bad
70	Average	<=Average	<=Average	Average	Bad	Bad
71	>=Average	Bad	Bad	Average	<=Average	Bad
72	>=Average	Bad	Bad	>=Average	Bad	Bad
73	>=Average	Bad	<=Average	Average	Bad	Bad
74	>=Average	*	Bad	Average	Bad	Bad
75	Average	<=Average	Average	Bad	<=Average	Bad
76	Average	<=Average	Average	<=Average	Bad	Bad
77	Average	<=Average	>=Average	Bad	Bad	Bad
78	>=Average	Bad	Average	Bad	<=Average	Bad
79	>=Average	Bad	Average	<=Average	Bad	Bad
80	>=Average	Bad	>=Average	Bad	Bad	Bad
81	>=Average	*	Average	Bad	Bad	Bad
82	>=Average	Good	Bad	Bad	<=Average	Bad
83	>=Average	Good	Bad	<=Average	Bad	Bad
84	>=Average	Good	<=Average	Bad	Bad	Bad
85	Good	>=Average	Bad	Bad	<=Average	Bad
86	Good	>=Average	Bad	<=Average	Bad	Bad
87	Good	>=Average	<=Average	Bad	Bad	Bad
88	Bad	<=Average	Bad	Good	Good	Average
89	<=Average	Bad	Bad	Good	Good	Average
90	Bad	<=Average	Average	Average	Good	Average
91	<=Average	Bad	Average	Average	Good	Average
92	Bad	<=Average	Average	Good	Average	Average
93	<=Average	Bad	Average	Good	Average	Average
94	Bad	<=Average	Good	Bad	Good	Average
95	<=Average	Bad	Good	Bad	Good	Average
96	Bad	<=Average	Good	Average	Average	Average
97	<=Average	Bad	Good	Average	Average	Average
98	Bad	<=Average	Good	Good	Bad	Average
99	<=Average	Bad	Good	Good	Bad	Average
100	Bad	Average	Bad	>=Average	Good	Average
101	Bad	Average	<=Average	Average	Good	Average
102	<=Average	>=Average	Bad	Average	Good	Average
103	*	Average	Bad	Average	Good	Average
104	Bad	Average	Bad	Good	>=Average	Average
105	Bad	Average	<=Average	Good	Average	Average
106	<=Average	>=Average	Bad	Good	Average	Average
107	*	Average	Bad	Good	Average	Average
108	Bad	Average	Average	<=Average	Good	Average
109	Bad	Average	>=Average	Bad	Good	Average
110	<=Average	>=Average	Average	Bad	Good	Average
111	*	Average	Average	Bad	Good	Average
112	Bad	Average	Average	Average	>=Average	Average
113	Bad	Average	Average	>=Average	Average	Average
114	Bad	Average	>=Average	Average	Average	Average
115	<=Average	>=Average	Average	Average	Average	Average
116	*	Average	Average	Average	Average	Average
117	Bad	Average	Average	Good	<=Average	Average
118	Bad	Average	>=Average	Good	Bad	Average
119	<=Average	>=Average	Average	Good	Bad	Average
120	*	Average	Average	Good	Bad	Average
121	Bad	Average	Good	Bad	>=Average	Average
122	Bad	Average	Good	<=Average	Average	Average
123	<=Average	>=Average	Good	Bad	Average	Average
124	*	Average	Good	Bad	Average	Average
125	Bad	Average	Good	Average	<=Average	Average
126	Bad	Average	Good	>=Average	Bad	Average
127	<=Average	>=Average	Good	Average	Bad	Average

128	*	Average	Good	Average	Bad	Average
129	Average	Bad	Bad	>=Average	Good	Average
130	Average	Bad	<=Average	Average	Good	Average
131	Average	*	Bad	Average	Good	Average
132	>=Average	<=Average	Bad	Average	Good	Average
133	Average	Bad	Bad	Good	>=Average	Average
134	Average	Bad	<=Average	Good	Average	Average
135	Average	*	Bad	Good	Average	Average
136	>=Average	<=Average	Bad	Good	Average	Average
137	Average	Bad	Average	<=Average	Good	Average
138	Average	Bad	>=Average	Bad	Good	Average
139	Average	*	Average	Bad	Good	Average
140	>=Average	<=Average	Average	Bad	Good	Average
141	Average	Bad	Average	Average	>=Average	Average
142	Average	Bad	Average	>=Average	Average	Average
143	Average	Bad	>=Average	Average	Average	Average
144	Average	*	Average	Average	Average	Average
145	>=Average	<=Average	Average	Average	Average	Average
146	Average	Bad	Average	Good	<=Average	Average
147	Average	Bad	>=Average	Good	Bad	Average
148	Average	*	Average	Good	Bad	Average
149	>=Average	<=Average	Average	Good	Bad	Average
150	Average	Bad	Good	Bad	>=Average	Average
151	Average	Bad	Good	<=Average	Average	Average
152	Average	*	Good	Bad	Average	Average
153	>=Average	<=Average	Good	Bad	Average	Average
154	Average	Bad	Good	Average	<=Average	Average
155	Average	Bad	Good	>=Average	Bad	Average
156	Average	*	Good	Average	Bad	Average
157	>=Average	<=Average	Good	Average	Bad	Average
158	Average	Good	Bad	<=Average	Good	Average
159	Average	Good	<=Average	Bad	Good	Average
160	>=Average	Good	Bad	Bad	Good	Average
161	Average	Good	Bad	Average	>=Average	Average
162	Average	Good	Bad	>=Average	Average	Average
163	Average	Good	<=Average	Average	Average	Average
164	>=Average	Good	Bad	Average	Average	Average
165	Average	Good	Bad	Good	<=Average	Average
166	Average	Good	<=Average	Good	Bad	Average
167	>=Average	Good	Bad	Good	Bad	Average
168	Average	Good	Average	Bad	>=Average	Average
169	Average	Good	Average	<=Average	Average	Average
170	Average	Good	>=Average	Bad	Average	Average
171	>=Average	Good	Average	Bad	Average	Average
172	Average	Good	Average	Average	<=Average	Average
173	Average	Good	Average	>=Average	Bad	Average
174	Average	Good	>=Average	Average	Bad	Average
175	>=Average	Good	Average	Average	Bad	Average
176	Average	Good	Good	Bad	<=Average	Average
177	Average	Good	Good	<=Average	Bad	Average
178	>=Average	Good	Good	Bad	Bad	Average
179	Good	Average	Bad	<=Average	Good	Average
180	Good	Average	<=Average	Bad	Good	Average
181	Good	>=Average	Bad	Bad	Good	Average
182	Good	Average	Bad	Average	>=Average	Average
183	Good	Average	Bad	>=Average	Average	Average
184	Good	Average	<=Average	Average	Average	Average
185	Good	>=Average	Bad	Average	Average	Average
186	Good	Average	Bad	Good	<=Average	Average
187	Good	Average	<=Average	Good	Bad	Average
188	Good	>=Average	Bad	Good	Bad	Average
189	Good	Average	Average	Bad	>=Average	Average
190	Good	Average	Average	<=Average	Average	Average
191	Good	Average	>=Average	Bad	Average	Average
192	Good	>=Average	Average	Bad	Average	Average

193	Good	Average	Average	Average	<=Average	Average
194	Good	Average	Average	>=Average	Bad	Average
195	Good	Average	>=Average	Average	Bad	Average
196	Good	>=Average	Average	Average	Bad	Average
197	Good	Average	Good	Bad	<=Average	Average
198	Good	Average	Good	<=Average	Bad	Average
199	Good	>=Average	Good	Bad	Bad	Average
200	Bad	<=Average	>=Average	Good	Good	Good
201	<=Average	Bad	>=Average	Good	Good	Good
202	<=Average	*	Average	Good	Good	Good
203	*	<=Average	Average	Good	Good	Good
204	Bad	<=Average	Good	>=Average	Good	Good
205	<=Average	Bad	Good	>=Average	Good	Good
206	<=Average	*	Good	Average	Good	Good
207	*	<=Average	Good	Average	Good	Good
208	Bad	<=Average	Good	Good	>=Average	Good
209	<=Average	Bad	Good	Good	>=Average	Good
210	<=Average	*	Good	Good	Average	Good
211	*	<=Average	Good	Good	Average	Good
212	<=Average	Good	<=Average	Good	Good	Good
213	*	Good	Bad	Good	Good	Good
214	<=Average	Good	Average	>=Average	Good	Good
215	<=Average	Good	>=Average	Average	Good	Good
216	*	Good	Average	Average	Good	Good
217	<=Average	Good	Average	Good	>=Average	Good
218	<=Average	Good	>=Average	Good	Average	Good
219	*	Good	Average	Good	Average	Good
220	<=Average	Good	Good	<=Average	Good	Good
221	*	Good	Good	Bad	Good	Good
222	<=Average	Good	Good	Average	>=Average	Good
223	<=Average	Good	Good	>=Average	Average	Good
224	*	Good	Good	Average	Average	Good
225	<=Average	Good	Good	Good	<=Average	Good
226	*	Good	Good	Good	Bad	Good
227	Average	>=Average	<=Average	Good	Good	Good
228	>=Average	Average	<=Average	Good	Good	Good
229	>=Average	>=Average	Bad	Good	Good	Good
230	Average	>=Average	Average	>=Average	Good	Good
231	Average	>=Average	>=Average	Average	Good	Good
232	>=Average	Average	Average	>=Average	Good	Good
233	>=Average	Average	>=Average	Average	Good	Good
234	>=Average	>=Average	Average	Average	Good	Good
235	Average	>=Average	Average	Good	>=Average	Good
236	Average	>=Average	>=Average	Good	Average	Good
237	>=Average	Average	Average	Good	>=Average	Good
238	>=Average	Average	>=Average	Good	Average	Good
239	>=Average	>=Average	Average	Good	Average	Good
240	Average	>=Average	Good	<=Average	Good	Good
241	>=Average	Average	Good	<=Average	Good	Good
242	>=Average	>=Average	Good	Bad	Good	Good
243	Average	>=Average	Good	Average	>=Average	Good
244	Average	>=Average	Good	>=Average	Average	Good
245	>=Average	Average	Good	Average	>=Average	Good
246	>=Average	Average	Good	>=Average	Average	Good
247	>=Average	>=Average	Good	Average	Average	Good
248	Average	>=Average	Good	Good	<=Average	Good
249	>=Average	Average	Good	Good	<=Average	Good
250	>=Average	>=Average	Good	Good	Bad	Good
251	Good	<=Average	<=Average	Good	Good	Good
252	Good	*	Bad	Good	Good	Good
253	Good	<=Average	Average	>=Average	Good	Good
254	Good	<=Average	>=Average	Average	Good	Good
255	Good	*	Average	Average	Good	Good
256	Good	<=Average	Average	Good	>=Average	Good
257	Good	<=Average	>=Average	Good	Average	Good
258	Good	*	Average	Good	Average	Good

259	Good	<=Average	Good	<=Average	Good	Good
260	Good	*	Good	Bad	Good	Good
261	Good	<=Average	Good	Average	>=Average	Good
262	Good	<=Average	Good	>=Average	Average	Good
263	Good	*	Good	Average	Average	Good
264	Good	<=Average	Good	Good	<=Average	Good
265	Good	*	Good	Good	Bad	Good
266	Good	Good	Bad	>=Average	Good	Good
267	Good	Good	<=Average	Average	Good	Good
268	Good	Good	Bad	Good	>=Average	Good
269	Good	Good	<=Average	Good	Average	Good
270	Good	Good	Average	<=Average	Good	Good
271	Good	Good	>=Average	Bad	Good	Good
272	Good	Good	Average	Average	>=Average	Good
273	Good	Good	Average	>=Average	Average	Good
274	Good	Good	>=Average	Average	Average	Good
275	Good	Good	Average	Good	<=Average	Good
276	Good	Good	>=Average	Good	Bad	Good
277	Good	Good	Good	Bad	>=Average	Good
278	Good	Good	Good	<=Average	Average	Good
279	Good	Good	Good	Average	<=Average	Good
280	Good	Good	Good	>=Average	Bad	Good
281	*	Good	Good	Good	Good	Very good
282	>=Average	>=Average	Good	Good	Good	Very good
283	Good	*	Good	Good	Good	Very good
284	Good	Good	>=Average	Good	Good	Very good
285	Good	Good	Good	>=Average	Good	Very good
286	Good	Good	Good	Good	>=Average	Very good

	Visual 33%	Taste 33%	Texture 33%	Sensory quality
1	Bad	Bad	Bad	Very bad
2	Bad	Bad	>=Average	Bad
3	Bad	<=Average	Average	Bad
4	<=Average	Bad	Average	Bad
5	Bad	Average	<=Average	Bad
6	Bad	>=Average	Bad	Bad
7	<=Average	Average	Bad	Bad
8	Average	Bad	<=Average	Bad
9	Average	<=Average	Bad	Bad
10	>=Average	Bad	Bad	Bad
11	Bad	Average	Good	Average
12	Bad	Good	Average	Average
13	Average	Bad	Good	Average
14	Average	Average	Average	Average
15	Average	Good	Bad	Average
16	Good	Bad	Average	Average
17	Good	Average	Bad	Average
18	<=Average	Good	Good	Good
19	Average	>=Average	Good	Good
20	>=Average	Average	Good	Good
21	Average	Good	>=Average	Good
22	>=Average	Good	Average	Good
23	Good	<=Average	Good	Good
24	Good	Average	>=Average	Good
25	Good	>=Average	Average	Good
26	Good	Good	<=Average	Good
27	Good	Good	Good	Very good

	Acidic 25%	Pungent 25%	Spicy 25%	Aromatic herbs taste 25%	Taste
1	Bad	Bad	Bad	Bad	Bad
2	<=Average	<=Average	<=Average	Average	Average
3	<=Average	<=Average	Average	<=Average	Average
4	<=Average	Average	<=Average	<=Average	Average
5	Average	<=Average	<=Average	<=Average	Average
6	*	*	*	Good	Good
7	*	*	Good	*	Good
8	*	Good	*	*	Good
9	Good	*	*	*	Good

	Sticky/Doughy bowl 50%	Chewability 50%	Texture
1	Bad	*	Bad
2	*	Bad	Bad
3	Average	>=Average	Average
4	>=Average	Average	Average
5	Good	Good	Good