



Modélisation de trajectoires acceptables de réarrangement de la consommation de sources protéiques pour augmenter l'adéquation nutritionnelle et impacts sur la durabilité

Erwan de Gavelle

► To cite this version:

Erwan de Gavelle. Modélisation de trajectoires acceptables de réarrangement de la consommation de sources protéiques pour augmenter l'adéquation nutritionnelle et impacts sur la durabilité. Alimentation et Nutrition. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français. NNT : 2019SACLA016 . tel-02382450

HAL Id: tel-02382450

<https://pastel.hal.science/tel-02382450>

Submitted on 27 Nov 2019

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.

Modélisation de trajectoires acceptables de réarrangement de la consommation de sources protéiques pour augmenter l'adéquation nutritionnelle et impacts sur la durabilité

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay
préparée à AgroParisTech (l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement)

Ecole doctorale n°581 Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)
Spécialité de doctorat : Sciences de la nutrition

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 01/07/2019, par

Erwan de Gavelle

Composition du Jury :

Jean-François Huneau Professeur, AgroParisTech (UMR PNCA)	Président du jury
Marie-Josèphe Amiot-Carlin Directrice de recherche, INRA (UMR MOISA)	Rapporteur
Irène Margaritis Professeure, Anses (Unité d'évaluation des risques liés à la nutrition)	Rapporteur
Benjamin Allès Chargé de recherche, INRA (EREN)	Examineur
Vincent Réquillart Directeur de recherche, INRA (Toulouse School of Economics)	Examineur
François Mariotti Professeur, AgroParisTech (UMR PNCA)	Directeur de thèse

Remerciements

La réalisation de cette thèse n'aurait pas été possible sans le concours de multiples collaborations et d'un travail collectif impliquant de nombreuses personnes, à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude.

Je tiens tout d'abord à remercier Marie-Josèphe Amiot-Carlin et Irène Margaritis qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être rapporteurs de ma thèse, ainsi que Benjamin Allès et Vincent Réquillart, qui m'ont fait l'honneur d'être examinateurs de ce travail.

Je remercie ensuite grandement mon directeur de thèse, François Mariotti, pour son encadrement, sa réactivité sans faille et ses compétences scientifiques et humaines qui m'ont permis de passer ces trois années de thèses dans les meilleures conditions envisageables.

Je remercie mon co-encadrant de thèse, Jean-François Huneau, pour ses conseils, toujours avisés et pertinents, et sa disponibilité, qui ont permis un vrai gain qualitatif dans mon travail de thèse.

Je remercie Claire Gaudichon et Daniel Tomé de m'avoir accueilli et accompagné au sein du laboratoire PNCA durant ces trois années.

Merci aux membres du comité de thèse, Emmanuelle Kesse-Guyot et Philippe Schmidely, d'avoir pris le temps de m'écouter et de discuter des méthodes et résultats de ma thèse, en apportant un regard différent.

Je remercie les collaborateurs scientifiques aux différents travaux de ma thèse pour leur temps et leur expertise, qui m'ont permis d'étendre mon champ de compétences : Clélia Bianchi, Nicolas Darcel, Olga Davidenko, Julien Delarue, Hélène Fouillet, Pascal Leroy, Philippe Lescoat, Caroline Orset, Véronique Sirot, Louis-Georges Soler et Eric Verger. Merci également à Jean-Michel Chardigny, Julien Delarue, Carole Foulon, Noémie Simon et Bérangère Véron pour nos échanges lors de réunions scientifiques.

Merci à l'ensemble des membres du laboratoire pour leur expertise scientifique et leur bonne humeur, et pour avoir fait de mon passage au laboratoire une expérience si enrichissante.

Merci aux stagiaires sans qui je n'aurais jamais pu finir ma thèse dans le temps : Marjorie, Roxane, Marion et Pierre.

Sur un plan plus personnel, je remercie grandement les jeunes docteurs et doctorants du laboratoire : Alya, Armelle, Chloé, Clélia, Florence, Gabrielle, Joanna, Joséphine, Marion, Martin, Moufidath, Nathalie, Olga, Olivier, Romain, Sandra, Sema, Simon, Trenton et Tristan. Ces trois années n'auraient pas été les mêmes sans les rires, la bonne humeur, le « projet commun » et la solidarité de chacun d'entre eux.

Merci à ma famille pour leur soutien sans faille.

Enfin, merci à mes amis pour leur soutien et leur écoute pendant ces années : Alice, Antoine, Aurélien, Baba, Camille, Constance, Elo, Gwen, Jaime, Jess, François, Lucie, Maëline, Marion, Matthieu, Quentin, Romain, Simon, Solène et Xiao.

« La science consiste à passer d'un étonnement à un autre. »
Aristote

Résumé

Dans les pays occidentaux, la consommation de protéines animales, majoritaire, diminue depuis une décennie. Elle est, dans la majorité des cas, associée négativement à différents paramètres de durabilité, et les études modélisant des régimes durables ont montré que les différents paramètres n'étaient pas toujours compatibles. Des régimes améliorant largement différents paramètres de durabilité ont été modélisés, mais la prise en compte de l'acceptabilité culturelle est insuffisante et nécessite des approfondissements. L'objectif de cette thèse était de modéliser des trajectoires acceptables de réarrangement de la consommation de sources protéiques pour augmenter l'adéquation nutritionnelle et d'en évaluer les impacts sur la durabilité. L'étude des consommations de sources de protéines en France a permis de conclure que les apports en protéines sont adéquats pour l'ensemble de la population, mais qu'il existe différents profils de consommation protéique, caractérisés par des niveaux de sécurité nutritionnelle différents. Une étude réalisée en 2018 a permis d'établir que les niveaux de consommation de viande étaient prédits par les attitudes, les normes sociales, et l'auto-efficacité perçue vis-à-vis de la réduction de la consommation de viande. Pour les travaux de modélisation pas-à-pas de l'alimentation, il a été considéré acceptable pour un individu de consommer un nouvel aliment, si celui-ci était largement consommé par des individus au profil de consommation protéique similaire. Cette hypothèse a été validée par une enquête en 2018. Les travaux de modélisation ont permis d'identifier que certaines recommandations alimentaires étaient efficaces pour l'ensemble de la population, mais que d'autres étaient spécifiques à certains profils de consommation protéique, caractérisés par des profils nutritionnels et des répertoires alimentaires spécifiques. Enfin, des modèles ont permis d'identifier que viser systématiquement plus de protéines végétales lors des premières modifications diététiques permet, malgré une adéquation nutritionnelle légèrement plus faible, d'obtenir de meilleurs paramètres de durabilité.

Abstract

In Western countries, the consumption of animal protein, which is the predominant protein source, has been decreasing over the last decade. This consumption has been negatively associated with different sustainability parameters in the majority of cases, and studies modelling sustainable diets have shown that the different parameters are not always compatible. Diets that significantly improve different sustainability parameters have been modelled, but the consideration of cultural acceptability is insufficient and requires further investigation. The objective of this thesis was to model acceptable trajectories of rearrangement of protein source consumption to increase nutritional adequacy and to evaluate its impacts on sustainability. The study of protein source consumption in France led to the conclusion that protein intake is adequate for the entire population, but that there are different profiles of protein intake characterized by different levels of nutritional security. A study conducted in 2018 found that meat consumption levels were predicted by attitudes, social norms, and perceived behavioral control related to the reduction of meat consumption. For the stepwise dietary modelling study, it was considered acceptable for an individual to consume a new food if it was widely consumed by individuals with a similar profile of protein intake. This hypothesis was validated by a survey conducted in 2018. The modelling work identified that some dietary recommendations were effective for the general population, but others were specific to certain profiles of protein intake characterized by specific nutritional profiles and food repertoires. Finally, models have identified that systematically targeting more plant proteins during the first dietary modifications allows, despite a slightly lower nutritional adequacy, to obtain better sustainability parameters.

Sommaire

Remerciements.....	3
Résumé	6
Abstract	7
Sommaire	8
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	11
Abréviations	12
Valorisation scientifique	14
Introduction générale	17
Chapitre 1- Introduction bibliographique	20
1. Consommation de sources de protéines dans les pays occidentaux.....	21
1.1. Contributeurs alimentaires et profils de consommation protéique.....	21
1.2. Evolution contemporaine de la consommation de sources de protéines.....	27
1.3. Motivations, freins et leviers à la modification de la consommation de sources de protéines	31
Conclusion partielle.....	39
2. Consommation de sources de protéines et impacts sur les paramètres de durabilité	40
2.1. Sources de protéines, sécurité nutritionnelle et sanitaire	40
2.2. Sources de protéines et maladies chroniques	50
2.3. Sources de protéines et impacts sur l'environnement.....	55
Conclusion partielle.....	60
3. Les sources de protéines dans les régimes durables	61
3.1. La durabilité dans les régimes observés.....	61
3.2. La modélisation de régimes améliorant ou optimisant la durabilité	66
3.3. L'acceptabilité dans la modélisation de régimes durables	72
Conclusion partielle.....	77
Conclusion générale	78

Chapitre 2 - Travaux de thèse	79
1. Justification des travaux	80
1.1. Etat des lieux des profils de consommation de sources de protéines et adéquation nutritionnelle en France	81
1.2. Trajectoires de réarrangements de la consommation de sources de protéines visant à améliorer l'adéquation nutritionnelle	85
1.3. Impacts des trajectoires modélisées sur les paramètres de durabilité	90
2. Travaux personnels.....	94
2.1. Travail personnel n°1 : L'adéquation des apports en protéines est avant tout une question de quantité de protéines et non de qualité : modélisation d'une augmentation du rapport protéines végétales/ protéines animales chez les adultes français	95
2.2. Travail personnel n°2 : Les profils de consommation protéique sont associés à l'adéquation nutritionnelle dans la population générale adulte française.....	120
2.3. Travail personnel n°3 : Les attitudes et croyances vis-à-vis des sources de protéines sont un bon prédicteur du degré de transition vers un régime pauvre en viande en France	148
2.4. Travail personnel n°4 : Le régime alimentaire initial devrait être pris en compte lorsqu'on modifie les tailles des portions des aliments sources de protéines pour augmenter l'adéquation nutritionnelle chez les adultes français	176
2.5. Travail personnel n°5 : La propension à modifier les tailles de portion ou à introduire de nouveaux aliments dépend largement du profil de consommation protéique	217
2.6. Travail personnel n°6 : La modélisation de modifications graduelles de la consommation de sources de protéines pour améliorer l'adéquation nutritionnelle mène à une meilleure durabilité lorsqu'on cible systématiquement les protéines végétales.	245
2.7. Travail personnel n°6bis : Les variations de consommation modélisées suivent-elles les tendances récentes, et quel impact auraient-elles sur la production agricole française à l'horizon 2027 ?	282
Chapitre 3 - Discussion	301
1. Discussion générale	302
2. Conclusion	317
3. Perspectives	319
Références	322

Liste des figures

Figure 1. Cadre conceptuel des systèmes alimentaires – régimes alimentaires et nutrition.....	18
Figure 2. Régimes d'exclusion de protéines animales	24
Figure 3. Consommation individuelle de viande totale (calculée par bilans) en France	27
Figure 4. Consommation individuelle européenne de viandes (UE à 15 pays – Indice base 100 en 2000)	28
Figure 5. Exemple de nouveaux axes de messages du Plan national nutrition santé (PNNS) retenus par le Haut Conseil de la Santé Publique	30
Figure 6. Concept des cadres de transition (bridging frames) des cadres existants aux cadres futurs.....	36
Figure 7. Scores individuels en acides aminés (ratio entre la quantité d'un acide aminé donné dans une protéine alimentaire et sa valeur dans la protéine de référence définie par la FAO/WHO) pour différentes protéines animales et végétales.	41
Figure 8. Contribution aux apports nutritionnels des américains des viandes et aliments végétaux dans l'étude NHANES (2007-2010, n=11 296).....	44
Figure 9. Contribution des principaux groupes alimentaires protéiques aux apports en quelques nutriments dans l'enquête INCA2 (n=1 912).	45
Figure 10. Risques relatifs liés à la consommation de viande transformée pour le cancer colorectal (A) et les maladies cardiovasculaires (B)	52
Figure 11. Emissions de gaz à effet de serre liées à l'agriculture, la foresterie et l'affectation des terres dans l'UE et en France entre 1990 et 2015.....	56
Figure 12. Impact environnemental par kg de produit selon AGRIBALYSE	59
Figure 13. Emissions moyennes de GES liées à la consommation de 100g ou 100kcal de groupes alimentaires chez les adultes de l'étude INCA2 (2006-2007, n=1 918).....	62
Figure 14. Contribution des groupes alimentaires aux émissions de GES des régimes individuels, par niveau d'émission de GES chez les adultes français de l'étude NutriNet-Santé 2014 (n = 34 193).	63
Figure 15. Différences relatives d'émissions de GES (kg eqCO ₂ /hab/an) entre les régimes moyens actuels et les régimes durables. n = nombre d'études, mdn = médiane	67
Figure 16. Variation (%) de quantité consommée des sous-groupes pour des régimes nutritionnellement adéquats pour différents niveaux de réduction des émissions de GES pour les femmes françaises de l'enquête INCA2.	68
Figure 17. Ecart des régimes optimisés aux régimes observés, avec les émissions de GES correspondantes.	74
Figure 18. Acceptabilité des modifications de consommation selon leur efficacité théorique.	76
Figure 19. Simulations d'amélioration "pas-à-pas" de l'adéquation nutritionnelle.....	88
Figure 20. Diagramme schématique du modèle PRIME	91

Liste des tableaux

Tableau 1. Apports en protéines provenant de sources alimentaires protéiques spécifiques chez les hommes et les femmes adultes (étude INCA2).....	23
Tableau 2. Raisons sélectionnées par les participants flexitariens et omnivores pour envisager une alimentation plus végétarienne (Belgique, 2011, n = 2436)	33
Tableau 3. Tableau résumant les freins et leviers à réduire la consommation de viande.....	35
Tableau 4. Cibles scientifiques pour un régime alimentaire planétaire, avec des gammes possibles, pour un apport de 2500 kcal par jour.....	70

Abréviations

AA : Acide aminé
AAI : Acide aminé indispensable
ACV : Analyse de cycle de vie
ACP : Analyse en composantes principales
AF : Analyse factorielle
AGS : Acides gras saturés
ALA : Acide alpha-linolénique
AVC : Accident vasculaire cérébral
BNM : Besoin nutritionnel moyen
BOLD : Le boeuf dans un régime maigre optimal / *Beef in an Optimal Lean Diet*
CAH : Classification ascendante hiérarchique
CIQUAL : Centre d'information sur la qualité des aliments
CIRC : Centre international de recherche sur le cancer
CREDOC : Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de Vie
DASH : Approches diététiques pour arrêter l'hypertension artérielle / *Dietary Approaches to Stop Hypertension*
DHA : Acide docosahexaénoïque
DON : Déoxynivalénol (mycotoxine)
EAT2 : Deuxième étude de l'alimentation totale française
EPA : Acide eicosapentaénoïque
EPIC : Enquête prospective européenne sur le cancer et la nutrition
FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GES : Gaz à effet de serre
HLPE : Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition
IMC : Indice de masse corporelle
INCA2 : Etude individuelle nationale des consommations alimentaires (France)
INPES : Institut national de prévention et d'éducation pour la santé
LA : Acide linoléique
MAR : Rapport d'adéquation moyen / *Mean Adequacy Ratio*
MER : Rapport d'excès moyen / *Mean Excess Ratio*
MCV : Maladies cardiovasculaires
NHANES : Enquête nationale sur la santé et la nutrition (Etats-Unis)
NMF : Factorisation de matrices non-négatives
PCB : Polychlorobiphényles
PNNS : Programme national nutrition santé
PRIME : Modèle intégré des risques évitables / *Preventable Risk Integrated Model*
RNP : Références nationales de population

TCP : Théorie du comportement planifié

TIAC : Toxi-infection alimentaire collective

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

Valorisation scientifique

Articles scientifiques

Faisant l'objet du travail de thèse

- Publiés :

de Gavelle E, Huneau J-F, Bianchi C, Verger E, Mariotti F. **Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults**. Nutrients 2017;9(12):1333. doi:10.3390/nu9121333.

de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. **Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population**. Nutrients 2018;10(2):226. doi:10.3390/nu10020226.

de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F. **The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults**. J Nutr 2019, 149:488-496. doi: 10.1093/jn/nxy275.

- En cours d'évaluation :

de Gavelle E, Leroy P, Perrimon M, Huneau J-F, Sirot V, Orset C, Fouillet H, Soler L-G, Mariotti F. **Modelled gradual changes in protein intake to increase nutrient adequacy lead to greater sustainability when systematically targeting an increase in the share of plant protein**. Climatic Change, 2019.

de Gavelle E, Davidenko O, Fouillet H, Delarue J, Darcel N, Huneau J-F, Mariotti F. **Self-declared attitudes and beliefs about protein sources well predict the extent of the transition to low-meat diet in France**. Appetite, 2019.

de Gavelle E, Davidenko O, Fouillet H, Delarue J, Darcel N, Huneau J-F, Mariotti F. **A willingness to modify portion sizes or eat new protein foods largely depends on the dietary pattern of protein intake**. Nutrition Journal, 2019.

Ne faisant pas l'objet du travail de thèse

- En cours de préparation

Salomé M, de Gavelle E, Dufour A, Dubuisson C, Volatier J-L, Fouillet H, Huneau J-F, Mariotti F. **Plant protein diversity is critical for nutritional adequacy of the diets when replacing animal with plant protein – observed and modelled diets of French adults (INCA3).**

Communications

- Communications orales :

de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. **Rearranging protein food intake with simple changes in portions to increase nutrient adequacy: what works for all and what depends on the initial dietary protein pattern.** *Epidemiological Research Addressing Diet and Health Outcomes – Nutrition* (American Society for Nutrition), Boston, 2018.

de Gavelle E, Perrimon M, Leroy P, Huneau JF, Orset C, Soler LG, Mariotti F. **Modifying protein food intakes for a better nutrient adequacy of the diet with or without a systematic substitution for more plant protein foods: impacts on sustainability.** *Toward a Sustainable Food System: Challenges and Implications - ePoster – Nutrition* (American Society for Nutrition), Boston, 2018.

de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. **Restructurer la consommation de sources protéiques par des modifications de tailles de portion pour augmenter l'adéquation nutritionnelle : ce qui fonctionne pour tout le monde et ce qui dépend du profil de consommation initial.** *Session MEILLEURS POSTERS EN 90'*, Journées Francophones de Nutrition, Nice, 2018.

- Communications affichées :

Perrimon M, de Gavelle E, Leroy P, Huneau JF, Orset C, Soler LG, Mariotti F. **Impacts toxicologiques, environnementaux et économiques de l'amélioration de l'adéquation nutritionnelle des régimes individuels par des modifications élémentaires de la consommation de sources protéiques.** Journées Francophones de Nutrition, Nantes, 2017.

de Gavelle E, Huneau J-F, Bianchi CM, Verger EO, Mariotti F. **Une modification du profil protéique est nécessaire pour assurer l'adéquation en protéines et en acides aminés lorsqu'on augmente le rapport protéines végétales/animales, résultats de modélisations sur une population adulte en France.** Journées Francophones de Nutrition, Nantes, 2017.

de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. **Les profils diététiques protéiques sont associés à l'adéquation nutritionnelle dans la population adulte française.** Journées Francophones de Nutrition, Nantes, 2017.

de Gavelle E, Perrimon M, Leroy P, Huneau JF, Orset C, Soler LG, Mariotti F. **Rearrangements of protein food intake with simple changes in portion sizes to increase nutrient adequacy.** Journée des doctorants ABIES, Paris, 2018.

de Gavelle E, Perrimon M, Leroy P, Huneau JF, Orset C, Soler LG, Mariotti F. **Modifying protein food intakes for a better nutrient adequacy of the diet with or without a systematic substitution for more plant protein foods: impacts on sustainability.** Nutrition (American Society for Nutrition), Boston, 2018.

de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. **Restructurer la consommation de sources protéiques par des modifications de tailles de portion pour augmenter l'adéquation nutritionnelle : ce qui fonctionne pour tout le monde et ce qui dépend du profil de consommation initial.** Journées Francophones de Nutrition, Nice, 2018.

de Gavelle E, Davidenko O, Fouillet H, Delarue J, Darcel N, Huneau J-F, Mariotti F. **Profil de consommation protéique et attitudes vis-à-vis des protéines animales des végétariens, flexitariens et omnivores d'une population représentative française.** Journées Francophones de Nutrition, Nice, 2018.

de Gavelle E, Leroy P, Perrimon M, Huneau J-F, Orset C, Fouillet H, Soler L-G, Mariotti F. **Modifier les apports protéiques pour améliorer l'adéquation nutritionnelle en visant systématiquement ou non davantage de protéines végétales : impacts sur la durabilité.** Journées Francophones de Nutrition, Nice, 2018.

Introduction générale

L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a défini en 2010 les régimes alimentaires durables comme « *des régimes alimentaires ayant de faibles conséquences sur l'environnement, qui contribuent à la sécurité alimentaire et nutritionnelle ainsi qu'à une vie saine pour les générations présentes et futures. Les régimes alimentaires durables contribuent à protéger et à respecter la biodiversité et les écosystèmes, sont culturellement acceptables, économiquement équitables et accessibles, abordables, nutritionnellement sûrs et sains, et permettent d'optimiser les ressources naturelles et humaines* » (Burlingame et Dernini 2012). De même, le groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition (HLPE) a défini en 2016 un système alimentaire durable comme étant « *un système alimentaire qui garantit à chacun la sécurité alimentaire et la nutrition sans compromettre les bases économiques, sociales et environnementales nécessaires à la sécurité alimentaire et à la nutrition des générations futures* » (HLPE 2018). Le HLPE définit un cadre conceptuel pour décrire les composantes d'un système alimentaire, en ajoutant, par rapports à des rapports antérieurs, trois dimensions majeures : l'environnement alimentaire (pour que les consommateurs puissent faire des choix amenant à une bonne adéquation nutritionnelle et une durabilité de l'alimentation), les régimes alimentaires (liens entre les systèmes alimentaires et la nutrition-santé), et les impacts de l'agriculture et des systèmes alimentaires sur le développement durable (économique, social, environnemental). Cinq catégories de facteurs déterminent l'évolution des systèmes alimentaires : les facteurs biophysiques et environnementaux, les facteurs liés à l'innovation, les technologies et l'infrastructure, les facteurs politiques et économiques, les facteurs socioculturels et les facteurs démographiques. Enfin, le HLPE identifie trois composantes des systèmes alimentaires : les chaînes d'approvisionnement alimentaire, les environnements alimentaires et le comportement des consommateurs. L'interaction entre les facteurs d'évolution et ces trois composantes détermine les résultats en termes de répercussions sur la santé et la nutrition, et d'impacts sociaux, économiques et environnementaux (**Figure 1**).

Les régimes alimentaires sont variés dans le monde. Dans ce même rapport, le HLPE fait un bilan des consommations alimentaires par région et de leur évolution. En 2013, la consommation de fruits était plus forte dans les pays à revenus élevés que dans les pays à faibles revenus, au contraire des légumes. Les produits laitiers étaient fortement consommés en Amérique du Nord et en Europe et les produits de la mer en Asie du Sud-Est. La consommation de viande rouge était similaire en Asie de l'Est, Amérique latine, Amérique du Nord et Europe et la viande transformée était fortement consommée essentiellement en Amérique latine, Amérique du Nord et Europe. Entre 1990 et 2013, la consommation de fruits et noix a augmenté dans la plupart des pays et la consommation de céréales complètes et produits de la mer a augmenté surtout en Asie du Sud-Est. La consommation de viande rouge non transformée a diminué ou stagné dans la plupart des régions, à part en Asie du Sud-Est (+40%) et la consommation de viande transformée a augmenté dans toutes les régions.

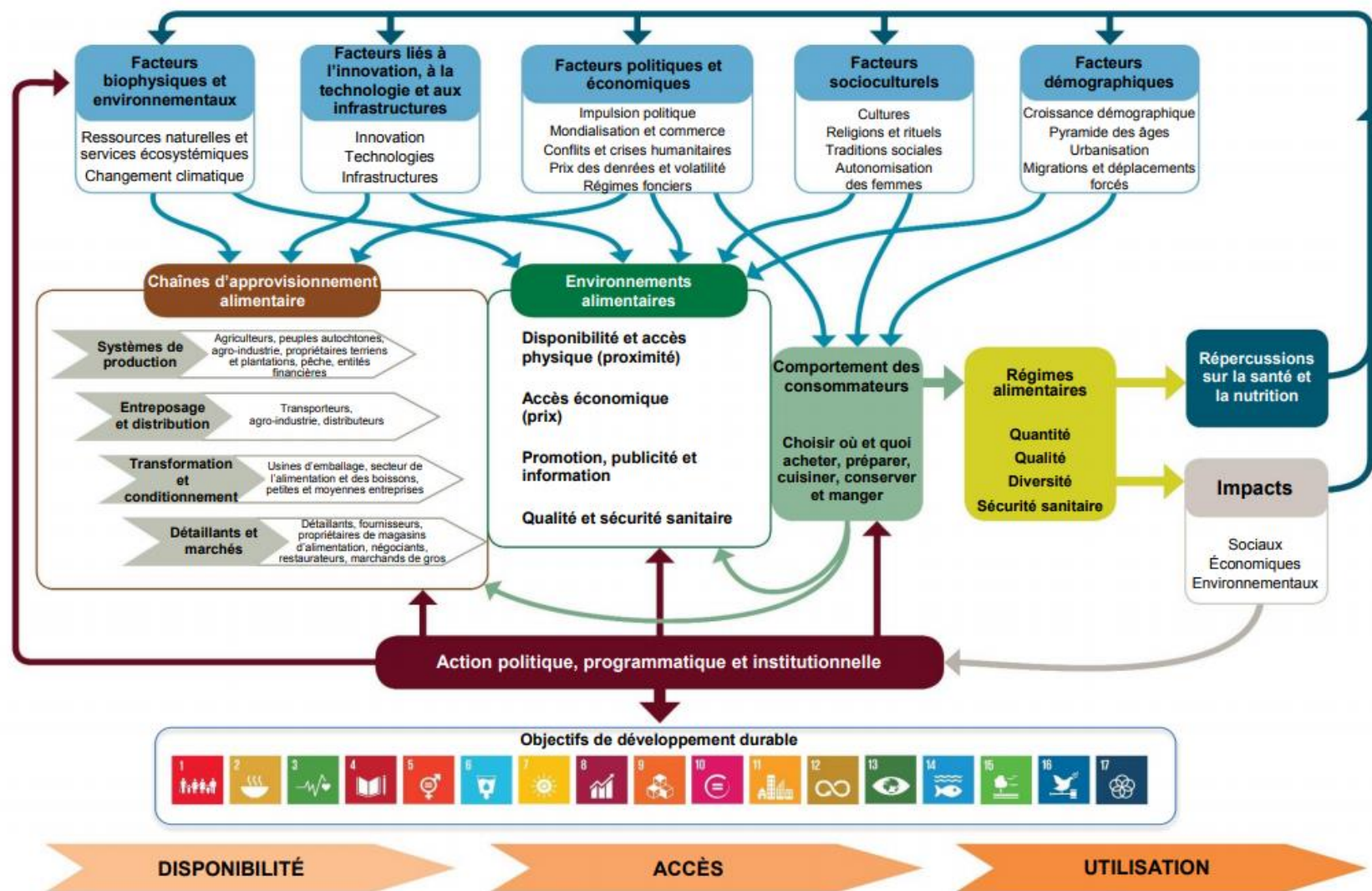


Figure 1. Cadre conceptuel des systèmes alimentaires – régimes alimentaires et nutrition
(extrait de HLPE 2018)

Le rapport explique ces évolutions de consommation par différents stades de transitions alimentaires. En effet, dans les régions vivant la « fin » de la transition alimentaire, avec des revenus qui augmentent dans la population, la consommation de protéines animales tend à se renforcer (à l'exception de l'Inde, où la part de végétariens est de l'ordre de 20%) (Tilman et Clark 2014). Cela engendre une baisse des phénomènes de dénutrition et de maladies infectieuses, mais une augmentation du taux d'obésité et de maladies chroniques non transmissibles (diabète de type 2, maladies cardiovasculaires ou cancers). Le HLPE définit une dernière phase de la transition nutritionnelle qui « *se caractérise par des changements de comportement qui commencent à inverser les tendances négatives induites par les transformations précédentes* ». Cependant, cette phase de transition ne s'observe que dans quelques cas localisés. Tilman et Clark ont évalué que si les tendances actuelles dans les transitions alimentaires se maintiennent dans les années à venir, les systèmes alimentaires ne pourront pas garantir une alimentation de qualité et durable au sens large. En effet, ils ont simulé les impacts prospectifs des régimes mondiaux en 2050, s'ils suivaient la tendance actuelle. Dans ce cas, les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées à l'alimentation augmenteraient de 80% et les surfaces nécessaires de 540 millions d'hectares. A partir d'objectifs de durabilité établis, certaines études ont identifié des régimes planétaires qui permettraient, si adoptés par tout le monde et couplés avec des refontes des systèmes de production, de répondre à long terme aux problématiques de santé, de biodiversité ou de changement climatique (Willett et al. 2019). Les transitions alimentaires étant progressives car nécessitant une évolution des chaînes d'approvisionnement et de l'environnement alimentaire pour faire évoluer le comportement du consommateur, la modélisation de régimes cibles est pertinente mais ne permet pas d'identifier les premières modifications du comportement alimentaire (les plus efficaces tout en étant acceptables) à recommander. Ainsi il semble nécessaire de pouvoir identifier des trajectoires à adopter pour aller à long terme vers des régimes durables.

L'objectif de cette thèse est d'identifier, au sein de populations occidentales, des trajectoires acceptables de réarrangements de la consommation de sources de protéines visant à améliorer l'adéquation nutritionnelle des régimes, et d'évaluer l'impact de ces trajectoires sur différents paramètres de durabilité.

Ce manuscrit présente, dans un premier chapitre, une introduction bibliographique composée de trois parties présentant (1) la consommation de sources de protéines dans les pays occidentaux, (2) les associations entre la consommation de sources de protéines et différents paramètres de durabilité et (3) les régimes durables tels qu'ils ont été observés ou modélisés. Un deuxième chapitre présentera les travaux de thèse, en introduisant d'abord la justification des travaux effectués, puis en présentant les six études menées, en décrivant les méthodes et discutant les résultats. Enfin, une troisième partie présentera la discussion de l'ensemble des travaux précédemment présentés et les perspectives envisageables à la lumière de cette discussion.

Chapitre 1- Introduction bibliographique

1. Consommation de sources de protéines dans les pays occidentaux

Pour identifier les liens entre consommation d'aliments sources de protéines et durabilité de l'alimentation, il convient de réaliser, dans un premier temps, un état des lieux des aliments sources de protéines consommés et des profils de consommateurs, puis d'étudier les évolutions récentes des habitudes de consommation, ainsi que les motivations, freins et leviers liés à ces évolutions.

1.1. Contributeurs alimentaires et profils de consommation protéique

- **Contribution des groupes alimentaires aux apports protéiques**

Au sein de la cohorte EPIC (Enquête prospective européenne sur le cancer et la nutrition, 1995-2000, $n = 36\,034$), les apports protéiques étaient entre 55 et 73% d'origine animale et entre 24 et 39% d'origine végétale (en excluant le groupe d'individus qualifiés de « soucieux de leurs santé » uniquement au Royaume-Uni) (Halkjaer *et al.* 2009). Au sein de protéines animales, les contributeurs les plus importants étaient la viande (de 38,1% pour les femmes en Grèce à 62,2% pour les hommes aux Pays-Bas) et particulièrement la viande rouge (entre 14,4% pour les femmes à Murcie et 38,5% pour les femmes à Raguse). Le porc contribuait de façon importante à l'apport en protéines animales en Allemagne (entre 25 et 30% pour les hommes et 18 et 21% pour les femmes), plus que dans les autres pays. Les produits laitiers contribuaient à l'apport protéique animal de 12,4 % à San Sebastian (hommes) à 41,6% à Utrecht (femmes). Enfin, le poisson était un important contributeur aux protéines animales en Grèce et en Espagne (entre 19,4 et 24,3%). En ce qui concerne les protéines végétales, le principal contributeur était les céréales (entre 42 et 69% pour les hommes et entre 35% et 61% pour les femmes). Les légumes contribuaient aux apports protéiques végétaux de 5% à 24%, les légumineuses de 0,1% à 15,6% et les fruits de 3,8% à 15,6 %, selon un gradient géographique croissant nord-sud pour ces trois groupes.

Aux Etats-Unis, dans l'enquête représentative NHANES (Enquête nationale sur la santé et la nutrition, 2007-2010, $n = 10\,977$), les protéines animales contribuaient à 64% des apports totaux, les protéines végétales à 30% et 8% des apports protéiques n'étaient pas classés (Pasiakos *et al.* 2015). Les principaux contributeurs animaux étaient le poulet (7,2%), le bœuf (6,2%), le lait (5,5%), le fromage (4,3%), la charcuterie (3,6%), les plats composés de viande (3,9%), les œufs et omelettes (3,3%) et le poisson (2,5%). Les principaux contributeurs végétaux étaient les pains et viennoiseries (5,6%), les plats à base de pâtes (2,4%), les noix et graines (2,0%) et les légumineuses (1,3%). Une autre étude états-unienne a montré dans la population de l'étude clinique PREMIER (1999-2002, $n = 809$) que les protéines animales contribuaient à environ 66% des apports protéiques (contre 34% pour les protéines végétales) (Lin *et al.* 2010). Les principaux contributeurs animaux dans le groupe contrôle étaient le poulet (17,2% des protéines totales), les produits laitiers (15,7%) et le bœuf (10,8%) et les principaux contributeurs végétaux étaient les céréales raffinées (14,7%), les légumes (6,0%) et les céréales complètes (4,3%).

En France, dans l'enquête représentative INCA2 (Etude individuelle nationale des consommations

alimentaires, 2006-2007, $n = 1\,912$), les protéines animales contribuaient à 69,5% des apports protéiques et les protéines végétales à 30,5% (Camilleri *et al.* 2013). Les principaux contributeurs étaient la viande (37,1% des protéines totales), dont la viande rouge (17,6%), puis les produits laitiers (21,4%) et les céréales (19,6%) (**Tableau 1**). Dans l'enquête INCA3 (2014-2015, $n = 2\,121$), les principaux contributeurs aux apports protéiques étaient les viandes, poissons et œufs (41%), dont 15% pour les viandes, 8,2% pour la volaille, 6,1% pour la charcuterie et 5,8% pour le poisson, puis les céréales (15%) et les produits laitiers (15%) (Anses 2017). Les sandwiches, pizzas, tartes, pâtisseries et biscuits salés contribuaient à 7,6% des apports protéiques totaux.

En résumé, dans les pays occidentaux, les protéines animales correspondent à environ 70% des apports protéiques totaux et les protéines végétales à 30%. Dans le détail, les contributeurs protéiques varient en fonction des pays : les pays méditerranéens ont une contribution importante aux apports protéiques du poisson, des légumes, légumineuses et fruits, au contraire des pays du Nord de l'Europe et des Etats-Unis où la viande et les produits laitiers sont les principaux contributeurs protéiques.

Tableau 1. Apports en protéines provenant de sources alimentaires protéiques spécifiques chez les hommes et les femmes adultes (étude INCA2)

	Men (<i>n</i> = 775)				Women (<i>n</i> = 1137)				<i>P</i> ³
	Age				Age				
	All	18-34 y	35-54 y	55-79 y	All	18-34 y	35-54 y	55-79 y	
<i>n</i>	775	143	332	300	1137	298	490	349	
Muscle proteins, <i>g/d</i>	41.2 ± 16.6 ^{1,2}	41.7 ± 19.9	41.5 ± 18.2	40.7 ± 14.6	36.9 ± 13.8	35.1 ± 11.7 ^a	37.6 ± 13.8 ^b	38.0 ± 15.1 ^b	<0.0001
Red meat	16.9 ± 12.4	19.2 ± 14.9 ^a	17.3 ± 12.8 ^{ab}	15.4 ± 10.9 ^b	14.1 ± 8.3	14.2 ± 8.5	14.1 ± 8.7	14.2 ± 8.1	<0.0001
Poultry	9.2 ± 10.1	10.0 ± 10.2	9.5 ± 11.1	8.6 ± 9.0	8.2 ± 8.4	8.2 ± 0.4	8.4 ± 8.5	7.9 ± 9.6	<0.05
Game	0.24 ± 1.9	0.09 ± 0.94	0.24 ± 2.0	0.32 ± 2.0	0.19 ± 0.94	0.17 ± 0.81	0.19 ± 0.94	0.22 ± 1.1	NS ⁴
Offal	0.82 ± 2.6	0.42 ± 1.6 ^a	0.67 ± 2.0 ^{ab}	1.2 ± 3.2 ^b	0.79 ± 2.2	0.50 ± 2.0 ^a	0.84 ± 2.1 ^b	1.0 ± 2.1 ^b	NS
Processed Meat	8.0 ± 6.9	8.0 ± 7.2	8.1 ± 6.8	7.9 ± 6.1	7.0 ± 4.9	6.9 ± 4.9	7.2 ± 4.7	6.8 ± 4.5	<0.01
Fish	6.0 ± 6.3	4.1 ± 5.1 ^a	5.7 ± 5.9 ^b	7.4 ± 6.8 ^c	6.6 ± 5.8	5.1 ± 4.9 ^a	6.9 ± 5.6 ^b	7.8 ± 6.4 ^b	<0.05
Dairy proteins, <i>g/d</i>	17.8 ± 10.1	18.8 ± 9.5	17.6 ± 11.3	17.5 ± 9.8	18.9 ± 8.9	18.7 ± 9.6	19.3 ± 9.7	18.5 ± 7.5	<0.05
Milk	5.3 ± 7.6	7.2 ± 7.5 ^a	5.4 ± 9.5 ^{ab}	4.2 ± 5.1 ^b	6.1 ± 6.1	6.8 ± 5.2 ^a	5.8 ± 7.0 ^b	5.7 ± 6.7 ^{ab}	<0.05
Yogurt	3.1 ± 4.1	3.1 ± 3.5	3.3 ± 3.8	3.0 ± 4.0	3.9 ± 3.6	2.8 ± 3.8 ^a	4.5 ± 4.4 ^b	4.1 ± 3.3 ^b	<0.0001
Cheese	9.0 ± 7.9	8.2 ± 5.9 ^a	8.5 ± 7.4 ^{ab}	10.0 ± 8.4 ^b	8.5 ± 6.1	8.7 ± 7.0	8.6 ± 6.2	8.4 ± 4.8	NS
Other dairy products	0.33 ± 0.35	0.34 ± 0.40	0.33 ± 0.30	0.33 ± 0.33	0.40 ± 0.35	0.42 ± 0.32 ^{ab}	0.43 ± 0.40 ^a	0.36 ± 0.28 ^b	<0.0001
Eggs, <i>g/d</i>	3.0 ± 2.3	3.2 ± 2.9	3.0 ± 2.3	3.0 ± 2.1	3.2 ± 2.8	3.2 ± 3.4	3.2 ± 2.1	3.2 ± 2.2	NS
Cereals, <i>g/d</i>	16.8 ± 6.0	16.0 ± 5.3	17.2 ± 7.0	16.9 ± 6.0	16.1 ± 4.6	16.3 ± 4.2	16.0 ± 4.4	16.0 ± 4.3	<0.01
Legumes, <i>g/d</i>	0.93 ± 2.0	0.73 ± 1.8	0.84 ± 2.1	1.1 ± 1.8	0.86 ± 1.6	0.74 ± 1.9	1.0 ± 1.4	0.86 ± 1.3	NS
Seeds and Nuts, <i>g/d</i>	0.55 ± 1.2	0.55 ± 1.1	0.66 ± 1.3	0.47 ± 1.1	0.66 ± 0.85	0.63 ± 0.82 ^{ab}	0.74 ± 0.90 ^a	0.59 ± 0.76 ^b	<0.05
Others, <i>g/d</i>	7.4 ± 2.7	6.6 ± 2.0 ^a	7.0 ± 3.4 ^a	8.1 ± 2.7 ^b	7.8 ± 2.7	6.9 ± 2.2 ^a	7.8 ± 2.5 ^b	8.6 ± 2.8 ^c	<0.01
Potatoes	1.6 ± 1.4	1.5 ± 0.9	1.6 ± 1.1	1.8 ± 1.6	1.6 ± 1.1	1.6 ± 1.2 ^{ab}	1.5 ± 1.1 ^a	1.8 ± 1.0 ^b	NS
Fruits	1.4 ± 1.7	1.1 ± 1.1 ^a	1.3 ± 2.2 ^a	1.7 ± 1.6 ^b	1.8 ± 1.9	1.4 ± 1.2 ^a	1.9 ± 1.9 ^b	2.1 ± 1.9 ^b	<0.001
Vegetables	2.5 ± 1.3	2.0 ± 1.2 ^a	2.3 ± 1.1 ^b	2.9 ± 1.3 ^c	2.6 ± 1.4	2.1 ± 1.4 ^a	2.6 ± 1.2 ^b	3.0 ± 1.3 ^c	NS
Others (spices...)	1.8 ± 1.2	2.0 ± 1.5	1.8 ± 1.0	1.7 ± 1.3	1.8 ± 1.0	1.8 ± 1.1	1.8 ± 1.0	1.7 ± 0.780	NS

¹ Values are means ± SD, *n* = 1912. Within sex, labelled means in a row without a common letter differ (*P* < 0.05; Post-hoc tests with Bonferroni correction).

² Protein intakes were energy-adjusted using the residual method.

³ *P* values for mean differences between men and women, as assessed using Student's *t* test. ⁴ NS, Not significant (*P* ≥ 0.05).

(D'après Camilleri et. al 2013)

- **Profils de consommateurs protéiques**

Les profils de consommateurs protéiques les plus décrits sont liés aux régimes d'exclusions de certaines sources protéiques : les végétariens et végétaliens. Dans un ouvrage de référence, Dagnelie et Mariotti ont considéré les végétariens comme « *toutes les catégories de régimes végétariens et de végétariens sans distinction, c'est-à-dire tous les régimes excluant la viande et le poisson, indépendamment du fait que d'autres produits animaux tels que les produits laitiers et/ou les œufs soient également exclus* » (Dagnelie et Mariotti 2017). Ils définissent les différentes formes d'alimentation à dominante végétale (comme le pesco-végétarisme, qui procède de l'exclusion de la viande mais pas du poisson) et de végétarisme : l'ovo-lacto-végétarisme (régime excluant la viande, le poisson et les fruits de mer, mais pas les produits laitiers ni les œufs), avec ses variantes (ovo-végétarisme et lacto-végétarisme), et le végétalisme/véganisme, qui exclue tous les produits d'origine animale (Figure 2).

				
Végétalien / Vegan	✗	✗	✗	✗
Lacto-végétarien	✗	✗	✗	✓
Ovo-végétarien	✗	✗	✓	✗
Ovo-lacto-végétarien	✗	✗	✓	✓
Pesco-végétarien	✗	✓	✓	✓
Flexitarien	Parfois	Parfois	✓	✓

Figure 2. Régimes d'exclusion de protéines animales

Enfin, les semi-végétariens ou flexitariens suivent de manière prédominante un régime végétarien (parmi ceux cités ci-dessus), mais consomment de manière occasionnelle des produits animaux (le plus souvent de la viande ou du poisson). On retrouve cette classification dans la littérature. Par exemple, au sein de la cohorte Adventiste (2002-2007, $n = 71\,751$), cinq profils de consommateurs protéiques ont été identifiés : les non-végétariens, les semi-végétariens, les pesco-végétariens, les lacto-ovo-végétariens et les végétariens stricts (Rizzo *et al.* 2013).

Au-delà de ces profils, identifiés à partir de l'exclusion de groupes alimentaires, et qui représentent une part minoritaire de la population, d'autres profils ont été identifiés à partir de

données de consommation de population générale par des analyses statistiques de régimes *a posteriori* (Analyse en composantes principales (ACP) ou analyse factorielle (AF)), éventuellement suivies de classifications d'individus aux régimes similaires (par classification ascendante hiérarchique (CAH) ou « k-means »). Newby et Tucker et Wirfält *et al.* ont effectué deux revues de la littérature en 2004 et 2013, respectivement, sur les études identifiant des profils de consommation, en lien avec la santé (Newby et Tucker 2004; Wirfält *et al.* 2013). Une première conclusion est la diversité des profils identifiés en fonction de la zone géographique concernée et de facteurs socio-économiques. Un type de régimes se retrouve sous différents noms (méditerranéen, prudent, sain ou nordique) dans majorité des études et est caractérisé par une consommation élevée de légumes, fruits, noix, céréales complètes, poisson, produits laitiers allégés et huiles végétales. De même, un type de régime « occidental » est caractérisé dans la plupart des études par une consommation élevée de viande rouge et transformée, plats type « fast-food », céréales raffinées, confiseries, bonbons, boissons sucrées et aliments ultra-transformés. Des régimes « traditionnels » sont aussi identifiés dans de nombreuses études et dépendent des régimes « historiques » des pays observés (Jannasch *et al.* 2018; Newby et Tucker 2004; Tucker 2010). Un profil caractérisé par une consommation élevée de desserts ou sucreries a également été observé dans 15 populations distinctes (Newby et Tucker 2004).

En France, l'Institut national de prévention et d'éducation pour la santé (INPES, désormais Santé Publique France) a réalisé une typologie de mangeurs dans le cadre du baromètre Santé Nutrition de 2008, à partir d'analyse de correspondances multiples (Escalon *et al.* 2009). Onze types de mangeurs ont été identifiés : les gastronomes traditionnels, les hédonistes, les gastronomes et pratiques, les pratiques, les pratiques en situation de précarité, les petits consommateurs en situation de précarité, les « mangent pour vivre », les diététistes, les néovégétariens, le régime santé et le régime méditerranéen. Bertin *et al.* ont identifié cinq typologies de mangeurs à partir des données alimentaires des adultes de l'enquête représentative INCA2 (2006-2007, $n = 2\,624$) en utilisant successivement une ACP et une HAC (Bertin *et al.* 2016). Le profil « prudent » était caractérisé par la consommation de produits laitiers, fruits, céréales pour petit-déjeuner, soupes, poisson, riz et blé, légumes, thé et eau. Deux profils similaires aux profils « occidentaux » étaient caractérisés par la consommation de sandwiches et burgers ou de plats préparés, pizzas, pâtes et aliments transformés sucrés. Le profil « traditionnel » était caractérisé par la consommation de viande, pain, beurre, fromage, pommes de terre, œufs, vin et café. Enfin, un profil « diversifié » était caractérisé par la consommation de légumes, légumineuses, pain, fromage, huile, fruits, poisson, bonbons, chocolat, pâtisseries et gâteaux et alcool. A partir des mêmes données de consommation, mais en utilisant une méthode de factorisation de matrices non-négatives

(NMF), Gazan *et al.* ont identifié des profils de consommateurs dans l'enquête INCA2. Cette méthode est reconnue plus adaptée pour traiter des données de consommation (qui sont par essence positives, avec beaucoup de « 0 ») que l'ACP (Gazan *et al.* 2016; Zetlaoui *et al.* 2011). Les profils identifiés étaient similaires entre les deux études, mais la NMF permettait une meilleure caractérisation des différents profils de consommation alimentaire que l'ACP. En effet, dans l'étude utilisant la NMF un seul profil « occidental » était identifié, regroupant la consommation de pizzas, sandwiches et burgers, sodas, céréales raffinées, plats préparés et viande, au contraire de l'étude utilisant l'ACP dans laquelle deux profils étaient caractérisés, dont un uniquement par la consommation de sandwiches et burgers.

Les profils alimentaires ci-dessus ont été identifiés à partir des apports alimentaires totaux uniquement. Ce n'est pas le cas de Mangano *et al.*, qui se sont intéressés aux liens entre profils de consommation protéiques des participants de l'étude Framingham Offspring (2002-2005, $n = 2\,986$) et la densité minérale osseuse et la santé musculo-squelettique (Mangano *et al.* 2015; Mangano *et al.* 2017). En ne considérant que les groupes alimentaires protéiques et en réalisant une classification à partir du pourcentage de contributions de ces groupes aux apports protéiques, ils ont identifié entre cinq et six profils de consommateurs protéiques différents. Les différents profils se distinguaient par la contribution particulièrement élevée d'un ou de quelques groupes protéiques : le poulet, le poisson, les aliments transformés, la viande rouge, le lait et les légumineuses (dans l'étude de 2017 uniquement). Ainsi, au contraire des profils identifiés à partir de l'ensemble des régimes alimentaires, qui sont caractérisés par la consommation de nombreux groupes alimentaires, il semble que les profils identifiés à partir des contributions aux apports protéiques soient caractérisés par un ou quelques groupes alimentaires (surtout des protéines animales). Il semblerait donc que les choix alimentaires protéiques reflètent la structure sous-jacente des régimes.

1.2. Evolution contemporaine de la consommation de sources de protéines

Après une augmentation progressive à la suite de la deuxième guerre mondiale, la consommation de produits d'origine animale, en particulier de viande, a diminué depuis le début des années 2000 en France (**Figure 3**) et dans les pays occidentaux (FAO 2018; FranceAgriMer 2015).

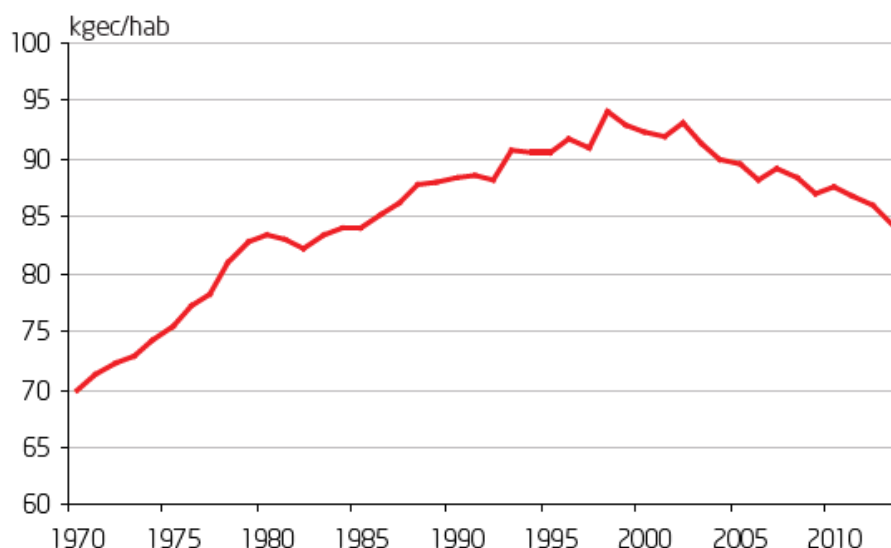


Figure 3. Consommation individuelle de viande totale (calculée par bilans) en France
(*extrait de FranceAgriMer 2015*)

Les types de viandes consommés évoluent également au cours du temps : on assiste à une diminution de la consommation de viande ovine, bovine et porcine et une augmentation de la consommation de viande de volailles au sein de l'UE à 15 pays (**Figure 4**). On observe également une évolution des produits consommés, au-delà de l'origine de la viande, entre 2003 et 2013 : la part de viande de boucherie a diminué de 45% à 39%, alors que la part de charcuterie a augmenté de 27% à 32% (FranceAgriMer 2015). Le Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de Vie (CREDOC) a évalué dans ses enquêtes Comportements et consommations alimentaires (qui ont lieu tous les trois ans) que la quantité de produits carnés consommée avait diminué entre 2007 et 2016 de 153 à 135 g/j en France. Les baisses les plus importantes concernaient les viandes de boucherie (de 58 à 46 g/j) et la charcuterie (de 35 à 29 g/j) (Tavoularis et Sauvage 2018).

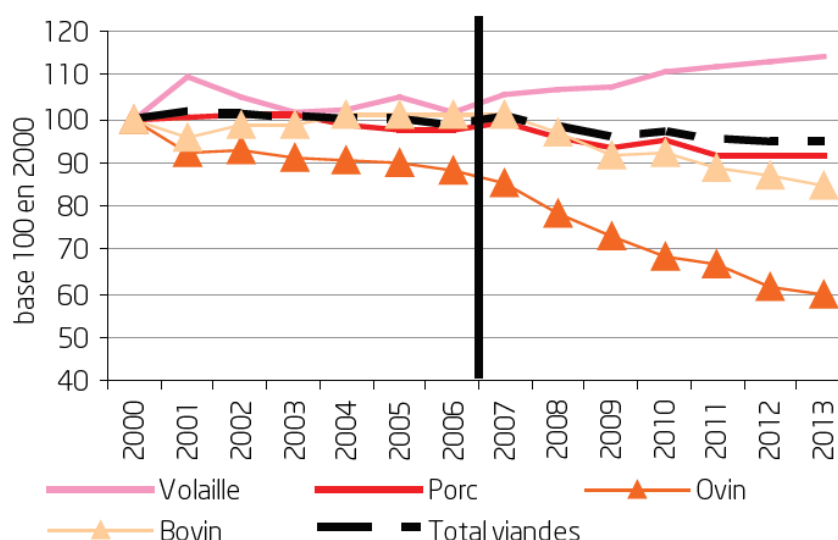


Figure 4. Consommation individuelle européenne de viandes (UE à 15 pays – Indice base 100 en 2000)

(extrait de FranceAgriMer 2015)

D'après le CREDOC, des différences sont observées en fonction de caractéristiques sociodémographiques : si la quantité de viande consommée diminue dans toutes les catégories socioprofessionnelles, la diminution la plus importante de consommation de produits carnés a été observée chez les ouvriers (de 178 à 151 g/j, soit -15%) et les cadres (de 140 à 113 g/j, soit -19%). Les évolutions récentes se manifestent également par une modification du mode de consommation de la viande : en 2016, les 18-24 étaient les plus gros consommateurs de viande, et particulièrement d'ingrédients carnés au sein de plats préparés et fast-food (25% de la quantité de produits carnés, contre 13% pour les 55-64 ans).

Les protéines végétales, quant à elles, ont vu leur consommation augmenter dans les dernières années. On ne dispose pas de données précises sur la consommation de produits à base de protéines végétales, mais le Groupe d'Etudes et de Promotion des Protéines Végétales a identifié une hausse de 18% du nombre de produits alimentaires contenant des protéines végétales en magasin en France entre 2013 et 2015, particulièrement au rayon traiteur (+46%) (Estève-Saillard 2016).

La proportion de végétariens est difficile à estimer car elle reste faible, dépend de la définition utilisée et se base souvent sur des données déclaratives. En Belgique, Mulle *et al.* ont identifié, dans un échantillon représentatif (2011, $n = 2\,436$), 1,6% de végétariens et 12% de semi-végétariens (ou flexitariens) (Mulle *et al.* 2017). Le pourcentage de végétariens dans l'enquête INCA2 (2006-2007) était de 0,5% (0,3%-0,8%), alors qu'il était de 1,8% (1,1%-2,9%) dans l'enquête INCA3 (2014-2015) (Anses 2011b; Anses 2017). Le CREDOC n'a identifié que

1,0% de la population française ne consommant aucun produit carné au cours d'une semaine en 2016 (contre 0,3% en 2007). La part de la population déclarant limiter sa consommation de viande a augmenté de 23% en 2015 à 35% en France en 2018. Cette tendance est encore plus prononcée chez les cadres et professions libérales (43% en 2018) d'après le CREDOC (Tavoularis et Sauvage 2018).

Au-delà de la perte de confiance dans les produits carnés due aux crises sanitaires (notamment la « crise de la vache folle ») de la fin des années 1990, la crise économique de 2008 a eu un rôle amplificateur dans ces tendances : la moyenne de la diminution de consommation de viande était de -0,5% par an entre 2000 et 2007 et a doublé entre 2008 et 2013 (-0,9% par an). En effet, la crise économique a induit une augmentation importante du prix moyen de la viande (+21% entre 2003 et 2013) et particulièrement des viandes de boucherie (+30%), au contraire du jambon (+6%). Les évolutions de la structure des ménages expliquent également en partie ces tendances. La taille des ménages est passée de 3,1 personnes en moyenne en 1968 à 2,3 en 2011, et les femmes accordent plus de temps au travail, études et à la formation qu'au temps domestique (-1h entre 1986 et 2010). Ainsi, le temps de préparation des repas diminue et les évolutions dans les pratiques culinaires aussi, ce qui explique l'augmentation de la consommation de produits élaborés, plus pratiques et plus rapides à préparer (FranceAgriMer 2015). Dans la dernière décennie, la diminution de la consommation de viande a été également motivée par l'émergence de préoccupations concernant les liens entre les niveaux de consommation de viande actuels et la santé humaine, le bien-être des animaux et l'environnement (Latvala *et al.* 2012).

Enfin, les repères de consommation officiels publiés dans les dernières années tendent à recommander l'augmentation de l'apport en protéines végétales (provenant notamment des légumineuses et des fruits à coque) et à limiter certaines protéines animales (charcuterie, viande rouge) (**Figure 5**) (Anses 2016c; HCSP 2018; U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture 2015). On peut donc imaginer que la tendance à la réduction du ratio protéines animales/protéines végétales se poursuivra dans les années à venir.

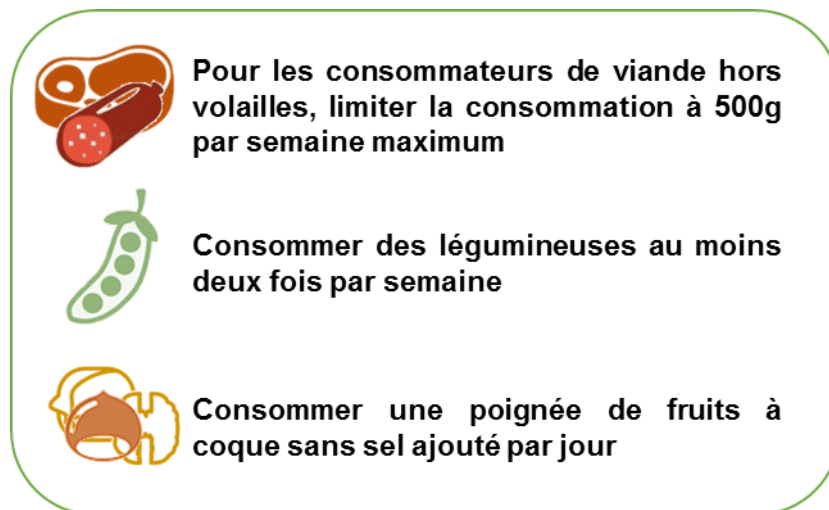


Figure 5. Exemple de nouveaux axes de messages du Plan national nutrition santé (PNNS) retenus par le Haut Conseil de la Santé Publique

(adapté de HCSP 2018)

1.3. Motivations, freins et leviers à la modification de la consommation de sources de protéines

La transition diététique précédemment décrite est le reflet de différents facteurs sociaux ou économiques, ainsi que le reflet d'une évolution des attitudes et croyances vis-à-vis des sources de protéines. Les individus n'ont pas tous les mêmes motivations à changer leur consommation alimentaire et des freins et leviers à ces changements ont été identifiés.

- **Attitudes et croyances vis-à-vis des sources de protéines et motivations à modifier sa consommation**

De nombreuses études récentes ont évalué les motivations à la modification de la consommation de sources de protéines, en lien avec les attitudes et croyances vis-à-vis des sources de protéines, et particulièrement la viande. Les attitudes à propos des impacts de la viande sur la santé, le bien-être animal et dans une moindre mesure l'environnement, semblent expliquer la motivation à faire évoluer sa consommation. En effet, de Backer *et al.* ont montré, dans un échantillon belge non représentatif (2012, $n = 299$), que les attitudes vis-à-vis du bien-être animal pouvaient prédire les régimes suivis ($R^2=0,47$). Les végétariens étaient plus préoccupés par le bien-être animal que les flexitariens, qui étaient plus préoccupés que les omnivores (De Backer et Hudders 2015). Clonan *et al.* ont montré, sur un échantillon d'adultes anglais (2009, $n = 842$), que les faibles consommateurs de viande étaient plus préoccupés par le bien-être animal que les forts consommateurs, mais que les attitudes en lien avec l'environnement n'étaient pas différentes entre les deux groupes (Clonan *et al.* 2015). Latvala *et al.* ont identifié différents profils de consommateurs dans une population finlandaise (2010, $n = 1\,623$) : 46% des individus avaient une consommation établie sans intention d'en changer, 13% avaient déjà vécu une transition vers une végétalisation de l'alimentation et 39% étaient en train de vivre cette transition. L'environnement et le bien-être animal étaient des motivations citées pour expliquer cette transition, mais la motivation principale, chez les individus vivant ou ayant vécu la transition, était la santé (Latvala *et al.* 2012). De même, Schösler *et al.* ont évalué aux Pays-Bas (2010, $n = 1\,083$) les raisons de ne pas consommer fréquemment de viande. Le fait de vouloir une alimentation diversifiée (43%) et la santé (42%) sont les raisons les plus citées, suivies du bien-être animal (20%) et de l'environnement (19%) (Schösler *et al.* 2014). Le fait que l'environnement soit peu cité comme une motivation pour diminuer sa consommation de viande a été exploré par Macdiarmid *et al.*, lors d'entretiens avec des adultes écossais (2013-2014, $n = 83$). Les auteurs ont identifié que les participants n'étaient souvent pas conscients du lien entre consommation de viande et changement climatique, ayant l'impression que leur consommation personnelle de viande avait un impact mineur dans le contexte global du changement climatique. De plus, un scepticisme par rapport aux preuves scientifiques était souvent soulevé (Macdiarmid *et al.* 2016). Cette hypothèse a été confirmée

par Vanhonacker *et al.*, qui ont demandé à des adultes flamands (2011, $n = 221$) de citer les comportements durables qu'ils adoptaient. Le recyclage des déchets et les économies d'énergie étaient les plus citées (89% et 77% des participants, respectivement), alors que consommer moins de viande n'était cité que par 34% des participants (Vanhonacker *et al.* 2013). Hartmann *et al.* ont également conclu, dans une revue de la littérature, que les consommateurs étaient peu conscients des effets de la consommation de viande sur l'environnement (Hartmann et Siegrist 2017).

Aux Etats-Unis, Pribis *et al.* ont évalué les motivations à être végétarien dans une population adventiste (2007, $n = 609$). Ils ont montré que, même si la santé restait la principale motivation à adopter ce mode de vie, les motivations dépendaient de l'âge des individus. Les moins de 20 ans évoquaient plus les raisons de bien-être animal et d'environnement que les autres classes d'âges. Les 41-60 ans évoquaient plus la santé que les autres classes d'âges (Pribis *et al.* 2010). Les motivations à consommer moins de viande dépendent également du régime adopté. Aux Pays-Bas, de Boer *et al.* ont analysé les motivations à réduire la consommation de viande dans différents groupes de consommateurs adultes de 18-35 ans (végétariens, faibles, moyens et forts consommateurs de viande) (2013, $n=707$). Parmi les néerlandais natifs, les végétariens étaient 71% à évoquer le bien-être animal comme motivation à ne pas consommer fréquemment de la viande, contre moins de 36% pour les autres groupes. Chez les faibles consommateurs de viande, 38% évoquaient la santé comme motivation, et les autres groupes (végétariens, moyens ou forts consommateurs de viande) avaient un pourcentage plus faible. Enfin, 41% des gros consommateurs de viande et 44% des consommateurs de viande « moyens » évoquaient l'environnement comme raison de consommer moins de viande contre 30% des faibles consommateurs de viande, et 21% des végétariens. Petti *et al.*, dans leur revue de littérature, ont séparé les végétariens en deux types. Tout d'abord, les végétariens « santé », qui adoptent un régime végétarien pour réduire leur risque de développer des maladies chroniques et éliminent graduellement la viande de leur régime, ne faisant que rarement la transition vers le végétalisme. Puis, les végétariens « éthiques », qui, adoptent un régime végétarien pour des raisons de bien-être animal, le plus souvent brutalement, associant la viande avec du dégoût et une détresse émotionnelle. Ces derniers sont plus susceptibles de faire la transition vers le végétalisme que les végétariens « santé » (Petti *et al.* 2017). En Belgique, Mullee *et al.* ont comparé les raisons d'envisager consommer un plat végétarien chez des omnivores et des flexitariens (2011, $n=2436$) (Mullee *et al.* 2017). La raison principale était la santé pour les deux régimes, mais le goût, le bien-être animal et l'environnement/le climat étaient ensuite les raisons les plus citées pour les flexitariens, alors que les omnivores évoquaient plutôt la découverte de nouveaux goûts et la perte de poids (**Tableau 2**).

Tableau 2. Raisons sélectionnées par les participants flexitariens et omnivores pour envisager une alimentation plus végétarienne (Belgique, 2011, $n = 2436$)

What could be reasons for you to consider eating a more vegetarian diet?	n (%)	
	Semi-vegetarians	Omnivores
My health	157 (15.5)	872 (17.4)
To discover new tastes	98 (9.7)	616 (12.3)
To reduce weight	72 (7.1)	527 (10.5)
No reason	5 (0.5)	481 (9.6)
The environment/climate	113 (11.1)	462 (9.2)
Animal welfare	102 (10.1)	380 (7.6)
It tastes good	127 (12.5)	346 (6.9)
Curiosity	39 (3.8)	331 (6.6)
Vegetarian housemate	58 (5.7)	280 (5.6)
There are sufficient vegetarian alternatives	86 (8.5)	221 (4.4)
Being creative	44 (4.3)	172 (3.4)
It is cheap	24 (2.4)	128 (2.6)
The third world	33 (3.3)	66 (1.3)
Spiritual/religious beliefs	13 (1.3)	37 (0.7)
Social pressure	6 (0.6)	36 (0.7)
Eating meat is a transitory phase	9 (0.9)	19 (0.4)
Other reason	6 (0.6)	18 (0.4)
One should be eating vegetarian	20 (2.0)	12 (0.2)
It is good for my image	4 (0.4)	10 (0.2)

(extrait de Mullee et al 2017)

- **Freins et leviers à un changement de consommation de sources de protéines**

Malgré diverses motivations à modifier sa consommation de sources de protéines, de nombreux freins existent à une moindre consommation de protéines animales. L'attachement ou l'habitude de consommer de la viande constituent les premiers freins à une moindre consommation. Graça *et al.* ont identifié dans une première étude au Portugal (2013, $n = 410$), un profil de participants (49% de la population) caractérisé par un attachement et une dépendance à la consommation de viande, en lien avec le déni des impacts négatifs de la consommation de viande et donc peu enclins à suivre un régime plus végétalisé (Graça *et al.* 2015b). Dans une deuxième étude, ils ont analysé plus en détails l'attachement à la viande à travers un questionnaire spécifique (2014, $n = 1\,023$). Ils ont identifié quatre dimensions de l'« attachement » à la viande : l'hédonisme (le plaisir de manger de la viande), l'affinité (liée aux attitudes quant aux impacts de la viande), le droit naturel à consommer de la viande (l'Homme est en haut de la chaîne alimentaire, manger de la viande est naturel) et la dépendance (la viande est au centre du repas et n'est pas remplaçable) (Graça *et al.* 2015a). En Finlande, Pohjolainen *et al.* ont mis en place un questionnaire dans le but d'identifier les freins à l'adoption d'un régime plus végétarien (2010, $n = 1\,890$). Les barrières identifiées étaient le plaisir de manger de la viande, les habitudes alimentaires, les croyances sur les impacts de la consommation de viande sur la santé et les difficultés à préparer des aliments végétariens. Ces freins étaient fortement corrélés et étaient particulièrement développés dans des populations spécifiques. En effet, les hommes, jeunes, habitant en milieu rural, ayant des enfants, peu éduqués et n'ayant pas d'amis ni de famille végétariens, avaient une fréquence de consommation de viande élevée et une perception des freins à une baisse de la consommation de viande plus importante que le reste de la population (Pohjolainen *et al.* 2015).

Les habitudes alimentaires, l'absence de familiarité avec les substituts à la viande et la méconnaissance des techniques de cuisine de plats végétariens ont également été identifiés comme des freins à la modification de consommation (Schösler *et al.* 2012).

Vinnari *et al.* ont analysé la littérature pour identifier les freins à l'adoption de régimes durables. Ils ont identifié cinq dimensions concernant les obstacles à cette transition. La première dimension est sociale : les individus considèrent que la viande est nutritionnellement essentielle, ne savent pas comment la viande est produite et trouvent une cohésion sociale dans le fait de consommer de la viande. La deuxième dimension est économique, car les individus considèrent que l'élevage est une part essentielle de l'économie et que les producteurs ne doivent pas être mis en danger par une modification des pratiques. La troisième dimension est en lien avec l'environnement, avec une méconnaissance du lien entre consommation de viande et changement climatique et un manque d'intérêt de la question. La quatrième dimension est culturelle : la consommation de viande fait partie de l'identité humaine, de la tradition et des normes sociales. Enfin, la dernière dimension concerne la relation à l'animal, comme les hommes se considèrent intrinsèquement supérieurs aux animaux, du fait, par exemple, de croyances religieuses (Vinnari et Vinnari 2014). Stoll-Kleemann et Schmidt ont évalué que les principaux freins à la diminution de la consommation de viande étaient les émotions et la dissonance cognitive (entre les connaissances, les valeurs et le comportement adopté), ainsi que des facteurs socioculturels (normes ou identité sociale) (Stoll-Kleemann et Schmidt 2017).

En lien avec les motivations et les freins identifiés, la littérature récente s'est concentrée sur des leviers à une restructuration de la consommation de sources de protéines. Stoll-Kleemann et Schmidt ont analysé la littérature et conclu que, pour les hommes et les personnes âgées, l'argument « santé » et la promotion du flexitarisme seraient les plus efficaces et que les messages en lien avec les émotions et la promotion de nouvelles normes sociales pourraient réduire les freins liés à la dissonance cognitive (Stoll-Kleemann et Schmidt 2017). Ils ont mis en avant la nécessité de voir émerger des infrastructures favorisant une alimentation plus végétale, avec des produits végétariens appétissants et abordables, même en restauration collective. Enfin, ils soulignent le rôle des leaders d'opinion consommant une alimentation plus végétalisée comme modèles de comportement, pour encourager l'acquisition de compétences dans la préparation de repas avec moins de viande ou sans viande. Ils ont résumé les principaux freins identifiés dans la littérature, et les leviers qui pourraient/devraient être mis en place en réponse à ces freins (**Tableau 3**).

Tableau 3. Tableau résumant les freins et leviers à réduire la consommation de viande

Facteur	Freins	Levier
Connaissances et compétences	Faible connaissance des conséquences d'une consommation élevée de viande et des raisons de réduire les comportements de consommation de viande ; Manque de compétences relatives aux questions pratiques (cuisine végétarienne) ; Mécanismes de déni provoqués par la dissonance cognitive, qui bloquent les nouvelles connaissances	Campagnes basées sur des messages émotionnels, des arguments spécifiques et avec des outils particuliers pour des groupes ciblés ; Accroître les compétences qui facilitent une alimentation végétalisée ; Mécanismes et outils pour surmonter la dissonance cognitive (voir ci-dessous)
Valeurs et attitudes	Faible priorité accordée aux valeurs/attitudes qui favorisent une faible consommation de viande ; Mécanismes de déni fournis par la dissonance cognitive et les normes sociales qui bloquent l'incorporation d'attitudes éthiques dans le comportement alimentaire.	Campagnes basées sur des messages émotionnels et symboliques ; Mécanismes et outils pour surmonter la dissonance cognitive (voir ci-dessous)
Émotions et dissonance cognitive	La dissonance cognitive bloque les nouvelles connaissances et les valeurs adéquates par des mécanismes de déni et de défense.	Messages émotionnels et symboliques, promotion de nouvelles normes sociales ; Éliminer la dissonance cognitive en changeant les comportements afin d'encourager la réduction de la consommation de viande.
Habitudes et goût	Les habitudes alimentaires quotidiennes comme routine inconsciente ; Préférences gustatives à l'égard de la viande ; Le système de production et d'approvisionnement a une influence majeure sur les habitudes alimentaires	Infrastructures favorisant l'alimentation d'origine végétale : les magasins et les restaurants végétariens (y compris les cantines et les hôpitaux) favorisant l'adoption de nouvelles habitudes alimentaires.
Variables sociodémographiques et traits de personnalité	Être un homme, âgé, appartenant à une classe sociale inférieure (en termes de revenu et/ou d'éducation) ; Traits de personnalité : être extraverti, faire face à un manque de conscience	Un argumentaire de santé fort pour les hommes et les personnes âgées ; Promouvoir le flexitarisme en tant que nouveau style alimentaire
Auto-efficacité	La faible perception de l'auto-efficacité à contrôler le comportement réduit la probabilité de se comporter de la manière souhaitée.	Accroître les compétences et l'estime de soi en mettant l'accent sur le rôle des leaders d'opinion végétaliens/végétariens en tant que modèles de comportement.
Culture et religion	Symbolisme attaché à la viande : désir d'exprimer le pouvoir humain pour dominer le monde naturel ; Croyance culturelle que la viande donne force et vigueur (en particulier aux hommes)	Tabous et interdictions dans plusieurs religions (par exemple le concept ahimsa) ; Promotion de nouvelles normes sociales et culturelles (voir ci-dessous)
Identité sociale et modes de vie	La consommation de viande en tant que marqueur social dans la construction des identités sociales et des modes de vie (par exemple en tant que signe de prospérité ou de masculinité)	Le flexitarisme comme nouveau style alimentaire ; Améliorer le statut social de l'alimentation d'origine végétale
Normes sociales, rôles et relations sociales	Perceptions du comportement normatif des proches qui favorisent la consommation de viande	Promotion de nouvelles normes sociales, par exemple en mettant l'accent sur le rôle des leaders d'opinion végétaliens ou végétariens en tant que modèles et marketing social communautaire.
Facteurs politiques et économiques	Manque de volonté politique ; De puissants lobbies dans l'agro-industrie ; Subventions élevées pour la production d'aliments d'origine animale ; Faibles prix des produits d'origine animale	Augmenter les prix (par exemple en éliminant les subventions dommageables, en internalisant les coûts externes et/ou en imposant des taxes sur la production et les produits animaux).
Environnement alimentaire	Absence d'infrastructures facilitant une alimentation végétalisée ; peu de magasins et de restaurants adaptés aux végétariens (cantines, réfectoires universitaires et hôpitaux), en particulier en zones rurales.	Augmentation des produits végétariens appétissants et abordables dans les supermarchés, sur les menus des restaurants, dans les hôpitaux, les cantines et les réfectoires des collèges.

(traduit de Stoll-Kleemann et Schmidt 2017)

Ces freins et leviers ont été également identifiés par de Boer et Aiking, qui proposent un concept de « cadres de transitions » pour faire évoluer les régimes basés sur la consommation de viande vers des régimes durables végétalisés. Ces cadres (recettes, information en points de vente) devraient s'appuyer sur les principes culinaires habituels de la variété, l'équilibre et la modération, offrir une dose modérée de nouveauté et permettre aux consommateurs de faire des associations sensorielles positives et des interprétations cohérentes de plats sains et durables à base de sources de protéines. Ces cadres doivent agir sur deux paramètres : essayer de consommer des plats durables sans viande mais savoureux et essayer de consommer des plats durables avec une faible quantité de viande. Ces petites étapes doivent permettre au consommateur d'aller vers d'autres expériences et le rendre sensible et ouvert aux arguments visant à réduire la consommation de viande, jusqu'à adopter un régime majoritairement basé sur des protéines végétales avec de faibles quantités de viande (**Figure 6**) (de Boer et Aiking 2017).

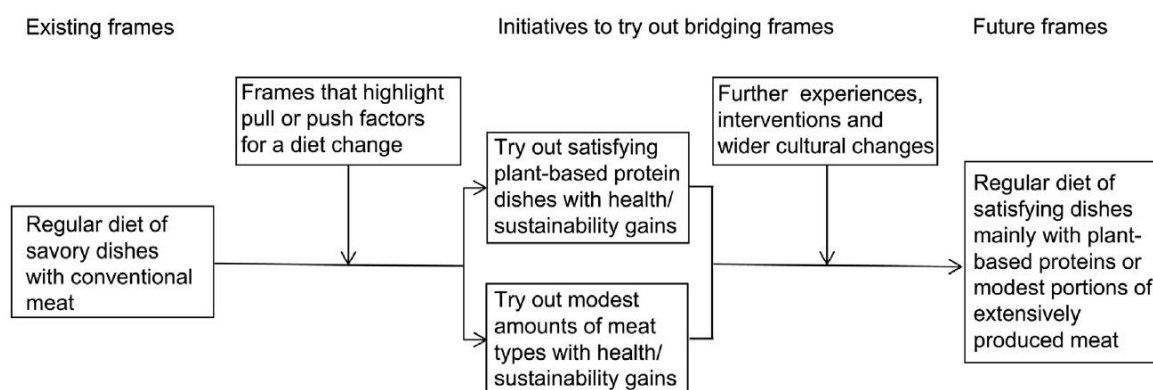


Figure 6. Concept des cadres de transition (*bridging frames*) des cadres existants aux cadres futurs

(extrait de de Boer et Aiking 2017)

• Théorie du comportement planifié

A partir de ces motivations, leviers et freins, certaines études ont cherché à expliquer la consommation de viande ou de protéines végétales avec des modèles comportementaux comme la théorie du comportement planifié (TCP) (Ajzen 1991). Selon cette théorie, l'intention de modifier un comportement est déterminée par les attitudes par rapport au comportement (jugement sur les conséquences), les normes sociales (considérations sur l'influence et l'opinion des proches sur le comportement) et les croyances en la capacité de l'individu à pouvoir modifier son comportement (auto-efficacité). Le changement de comportement est déterminé par l'intention de changer de comportement et l'auto-efficacité. Aux Etats-Unis, Wyker et Davison ont utilisé la TCP pour prédire l'intention d'adopter un régime essentiellement végétal, avec de faibles quantités de protéines animales ($n = 204$) (Wyker et

Davison 2010). L'intention de suivre ce régime était prédite par un modèle incluant les attitudes, les normes sociales et l'auto-efficacité ($R^2 = 0,61$). Les différents scores étaient notés sur sept, et une augmentation d'un point d'attitude était associée à 0,59 point d'intention supplémentaire ($P < 0,001$), 1 point de normes subjectives à 0,46 point d'intention ($P < 0,001$) et 1 point d'auto-efficacité à 0,13 point d'intention ($P < 0,05$). Dans leur modèle, l'intention et l'attitude étaient associées au stade de transition vers ces régimes végétalisés (trois stades : individus ne prévoyant pas de modifier leur alimentation, individus prévoyant de modifier leur alimentation et individus ayant modifié leur alimentation). L'auto-efficacité n'était pas différente entre le stade de prévoir de modifier son alimentation et le stade de modification de l'alimentation. De même, en Suisse, Weibel *et al.* ont utilisé un modèle de la TCP pour expliquer les différences entre les différences phases de transition vers un régime végétalisé (2015, $n = 1\,818$). Les attitudes (dont la prise de conscience des impacts de la viande sur la consommation énergétique), l'auto-efficacité et les normes personnelles étaient associées aux différences entre stade de refus de modifier son alimentation, stade d'intention de changer son alimentation, stade où l'alimentation se végétalise peu à peu et stade où l'alimentation est végétalisée. Les normes sociales ne différenciaient que le stade de refus de changer et le stade d'intention de changer (Weibel *et al.* 2019).

- **Interventions**

En se basant sur les résultats précédents, des études d'intervention ont été mises en place pour réduire la consommation de viande en ciblant les déterminants du comportement alimentaire. Ces interventions pouvaient être des conseils sur le mode de vie, de l'« autosurveillance » (en déclarant sa consommation de viande par message régulièrement) ou de l'apport d'information sur les conséquences de la viande. Bianchi *et al.* ont effectué une revue de la littérature et ont conclu que les interventions visant à conseiller sur le mode de vie et l'autosurveillance étaient associés à une réduction de la consommation de viande. L'apport d'information concernant les impacts de la viande sur la santé, l'environnement et le bien-être animal était associé aux intentions de réduire la consommation, mais pas au fait de réduire la viande (Bianchi *et al.* 2018b). Les mêmes auteurs ont également fait une revue de la littérature des études d'intervention visant à restructurer le microenvironnement physique pour réduire la consommation de viande (Bianchi *et al.* 2018c). Ils concluent que les études visant à réduire la consommation de viande en réduisant la taille des portions disponibles ou servies étaient efficaces pour réduire la consommation de viande. C'est également la conclusion d'une étude d'intervention récente non incluse dans cette revue, montrant que de plus petites portions de saucisses disponibles en magasin étaient favorisées par rapport aux portions standards, sans compensation sur d'autres produits (Vandenbroele *et al.* 2018). De même, les études proposant des alternatives à la viande avec un support informatif sur les impacts de la viande

étaient efficaces pour réduire la consommation de viande. Dans la majorité des études, manipuler les propriétés sensorielles de la viande ou recourir à d'autres stratégies (par exemple, inclure une tête de porc à côté d'un rôti de porc) diminuait la consommation de viande. La majorité des études visant à positionner la viande de façon moins visible dans les lieux d'achats étaient associées à une diminution des achats de viande. Les études modifiant le prix ou celles modifiant plusieurs aspects du microenvironnement en même temps n'étaient pas toutes cohérentes et les auteurs n'ont pas conclu sur leurs effets.

Conclusion partielle

Les protéines animales contribuent à environ deux tiers des apports protéiques dans les régimes occidentaux. La viande est le principal contributeur aux apports protéiques animaux, et les céréales le principal contributeur aux apports protéiques végétaux, avec des disparités régionales et sociodémographiques. Différents profils de consommateurs *a posteriori* ont été identifiés à partir de données de consommation. Deux profils fréquemment décrits s'opposent : les régimes « prudents » basés sur la consommation de produits laitiers, de poisson, des fruits et légumes, de riz et blé complets et les régimes « occidentaux » basés sur la consommation de plats préparés, de plats types « fast-food » et d'aliments transformés en général. Les profils de consommation protéique identifiés montrent que les individus se démarquent les uns des autres par la contribution aux apports protéiques d'un (ou de quelques) groupes alimentaires, le plus souvent une source de protéines animales. La consommation de viande a diminué dans les pays occidentaux depuis le début des années 2000, particulièrement le bœuf et le porc, alors que la consommation de viande de volaille a augmenté. La part de végétariens dans la population française augmente mais reste faible ($\leq 2\%$). Cependant, depuis quelques années, le pourcentage de la population limitant consciemment sa consommation de viande augmente rapidement. Les repères de consommation vont dans le sens de la tendance observée. Les principales motivations à diminuer sa consommation de viande sont la santé et dans une moindre mesure le bien-être animal (pour les végétariens ou végétaliens) et l'environnement (pour les plus jeunes et les plus gros mangeurs de viande). Les freins identifiés sont les habitudes alimentaires et le plaisir liés à la consommation de viande, les normes sociales et la dissonance cognitive amenant à un déni ou un manque d'intérêt à propos des informations sur les impacts de la consommation de viande. Les leviers identifiés sont le développement de produits et d'infrastructures favorables à une moindre consommation de viande et de campagnes basées sur des messages émotionnels promouvant le flexitarisme, ainsi que la promotion de recettes de plats sans viande pour encourager le consommateur à s'ouvrir, pas à pas, à de nouveaux modes de consommation. Diminuer les tailles de portions, proposer des alternatives, ou manipuler les propriétés sensorielles de la viande sont également des leviers à une moindre consommation de viande.

2. Consommation de sources de protéines et impacts sur les paramètres de durabilité

2.1. Sources de protéines, sécurité nutritionnelle et sanitaire

- **Quantité et qualité des protéines**

Les protéines alimentaires sont indispensables pour fournir l'azote et les acides aminés (AA) nécessaires à subvenir à nos besoins métaboliques, en particulier au besoin de renouvellement de nos protéines corporelles. Les résultats d'études de bilan azoté ont été utilisés pour définir un besoin en protéines, en utilisant des protéines alimentaires de "bonne qualité" (Anses 2016a; FAO Expert Consultation 2011). Le besoin nutritionnel moyen (BNM) en protéines pour les adultes a été ainsi fixé à 0,66 g/kg poids corporel (p.c.)/j (CV=12,5%) à partir d'une méta-analyse de 19 études regroupant 235 individus (Mariotti 2016; Rand et al. 2003). Les données du Centre d'information sur la qualité des aliments (CIQUAL) montrent que les aliments d'origine animale contiennent plus de protéines que les aliments d'origine végétale. En effet, en pourcentage massique, la viande cuite contient environ 25% de protéines, le fromage 22% et les œufs 12%, alors que les pâtes ne contiennent que 6% de protéines, les légumineuses 8% et les noix 13% (Anses 2016d).

Cependant, au-delà de la quantité de protéines ingérées, la biodisponibilité des protéines absorbées dépend de deux critères : la digestibilité et le profil en AA de la protéine (ou du mélange de protéines) considérée(s). La méthode la plus précise pour calculer la digestibilité des protéines est la mesure de la digestibilité iléale réelle chez l'Homme, telle que recommandée par la FAO (FAO Expert Consultation 2011). La digestibilité d'isolats ou farines de protéines de soja, blé ou lupin a ainsi été estimée entre 89 et 92%, alors que celle des protéines d'œufs, de viande ou de lait a été estimée entre 91 et 95% (Oberli et al. 2015; Tome 2013). La différence entre les sources de protéines animales et végétales semble donc faible, d'autant plus que les protéines analysées venaient de sources brutes et non traitées et qu'il a été montré que des traitements thermiques augmentaient la digestibilité des protéines végétales (Mariotti 2017).

Les AA alimentaires sont utilisés efficacement s'ils sont fournis en quantités et proportions optimales pour leur incorporation dans la synthèse protéique. Neuf AA, qui ne peuvent être synthétisés *de novo* dans l'organisme, ou pas à une vitesse suffisante, sont classés comme indispensables (AAI) : le tryptophane, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, la valine, la leucine, l'isoleucine et l'histidine. Les besoins en AAI ont été déterminés à partir de méthodes isotopiques. On peut ainsi calculer, à partir de ces besoins, un profil de référence de composition en AAI, c'est-à-dire un profil pour lequel le besoin en chaque AAI est satisfait pour un apport en protéines correspondant au BNM (soit 0,66g/kg p.c./j). En comparant la

concentration de chaque AAI d'une protéine à ce profil de référence, on peut ainsi calculer un score individuel pour chaque AA (noté AAS). Un score peut aussi être calculé à l'échelle d'une protéine, et est assimilé à celui de l'AA ayant la valeur la plus faible, dit acide aminé « limitant ».

En calculant les scores en AA individuels des principales sources de protéines animales et végétales, on observe que deux catégories d'AAI sont parfois limitants : la lysine et les acides aminés soufrés (Méthionine + Cystéine) (**Figure 7**). En utilisant les données du Département de l'Agriculture des Etats-Unis (USDA), Mariotti a identifié que la lysine n'était pas présente en quantité suffisante dans la plupart des céréales (par exemple le blé a un score de 49%) et que les acides aminés soufrés étaient présents en trop faible quantité dans certaines légumineuses (dont les fèves et le lupin) (Mariotti 2017). Cependant, la plupart des sources de protéines ayant des AAS supérieurs à 1 pour la lysine et les acides aminés soufrés, un mélange de différentes sources de protéines peut « compenser » les déficiences de certaines sources. Ainsi, les régimes occidentaux, composés d'environ 65% de protéines animales ne présentent vraisemblablement pas d'acides aminés limitants et, dans d'éventuels régimes végétariens, mélanger différentes sources de protéines permettrait de compléter les profils déséquilibrés de certaines sources.

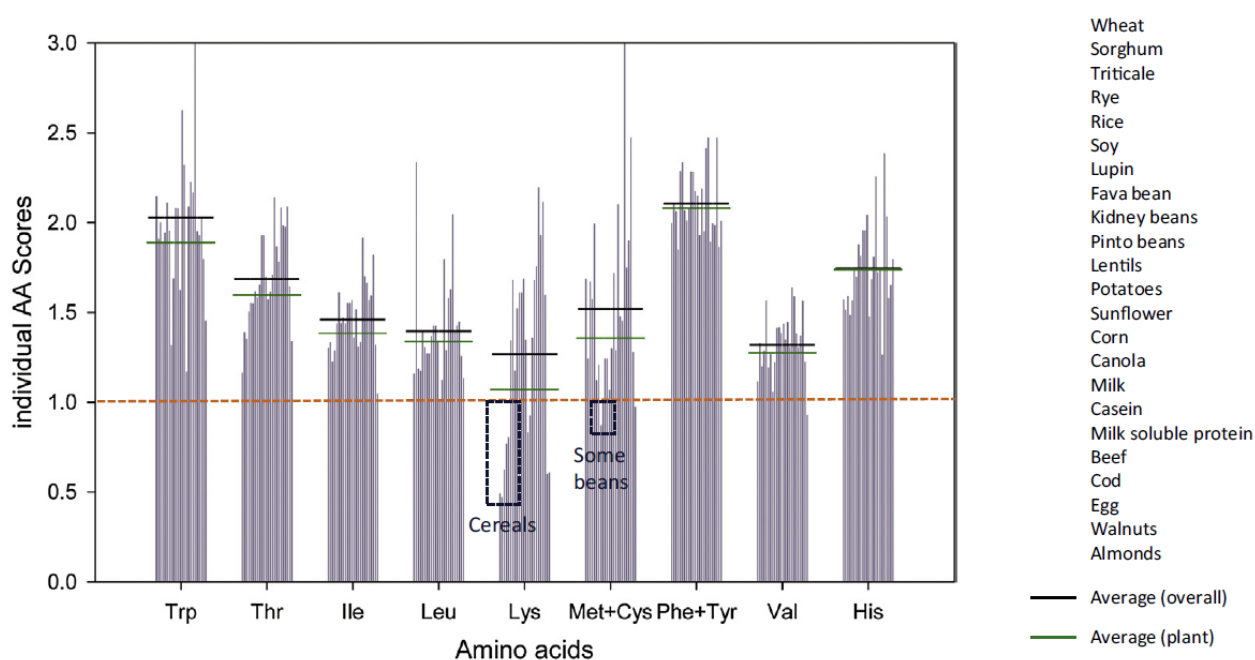


Figure 7. Scores individuels en acides aminés (ratio entre la quantité d'un acide aminé donné dans une protéine alimentaire et sa valeur dans la protéine de référence définie par la FAO/WHO) pour différentes protéines animales et végétales.

(extrait de Mariotti 2017)

Les apports en protéines des populations occidentales ont été évalués dans de nombreuses études, pour des régimes omnivores ou particuliers. Dans la cohorte européenne EPIC,

l'apport protéique moyen était entre 0,91 et 1,83 g/kg p.c./j en fonction des centres et des pays étudiés, ce qui se situe au-dessus de la référence nationale de population (RNP) de 0,83 g/kg p.c./j. Aux Etats-Unis, dans l'étude NHANES (2003-2004), l'apport protéique moyen était entre 1,0 g/kg p.c./j pour les plus de 70 ans et 1,3 g/kg p.c./j pour les 19-30 ans (Fulgoni 2008). En France, l'AFSSA (désormais Anses) a estimé dans l'enquête INCA1 (1998-1999, $n = 1\,474$) l'apport moyen en protéines à 1,4 g/kg p.c./j (AFSSA 2007a). Dans l'enquête INCA2 (2006-2007, $n = 1\,912$), l'apport moyen en protéines a été estimé à 86 g/j, soit 1,2 g/kg p.c./j en considérant un poids moyen de 70kg (Camilleri *et al.* 2013). Les apports en protéines de populations consommant plus ou moins de protéines végétales ont également été évalués. Dans la cohorte Adventiste (2002-2007, $n = 71\,751$), Rizzo *et al.* ont calculé les apports en protéines de populations omnivores, végétariennes et végétaliennes et n'ont pas trouvé de différence significative entre les apports protéiques totaux des différents groupes (environ 75 g/j), alors que les apports protéiques des végétariens étaient à 83% végétaux (Rizzo *et al.* 2013). Clarys *et al.* ont fait de même en Belgique (2012, $n = 1\,474$) et ont trouvé des différences significatives entre végétaliens (82g/j), végétariens (93 g/j) et omnivores (112 g/j). Cependant, les omnivores étant plus en surpoids et obèses que les autres populations, les apports exprimés par kg de poids corporel sont vraisemblablement plus proches (Clarys *et al.* 2014). Dans toutes ces études, les apports protéiques restent à des niveaux élevés, même pour les populations consommant le plus de protéines végétales.

Cependant, ces données d'apports (qui ne correspondent pas toujours à l'apport usuel d'une population) ne permettent pas d'évaluer la prévalence d'inadéquation dans une population. Peu d'études ont évalué la prévalence d'inadéquation en protéines alimentaires. Aux Etats-Unis, Fulgoni *et al.* ont évalué dans l'enquête NHANES (2003-2004) que la prévalence d'inadéquation en protéines était quasi nulle pour les hommes et que 7,7% des femmes adolescentes et 7,2 à 8,6% des femmes les plus âgées avaient des apports protéiques inférieurs aux besoins (Fulgoni 2008). Au Royaume-Uni, Sobiecki *et al.* ont évalué la prévalence d'inadéquation en protéines dans l'étude EPIC-Oxford (1993-1999, $n = 30\,251$) à 2,5% chez les hommes et 1,2% chez les femmes omnivores. En revanche, chez les végétariens, l'inadéquation était plus élevée (9,8% chez les hommes et 6,0% chez les femmes), ainsi que pour les végétaliens (16,5% chez les hommes et 8,1% chez les femmes) (Sobiecki *et al.* 2016). En France, dans l'enquête INCA1 (1998-1999, $n=1\,474$), l'ensemble de la population avait des apports adéquats (AFSSA 2007a). Perignon *et al.* ont estimé dans INCA2 (2006-2007, $n = 1\,912$) la prévalence d'inadéquation à 3,3% (1,4% pour les hommes et 4,5% pour les femmes) (Perignon *et al.* 2018).

La qualité des protéines n'est presque jamais prise en compte lors du calcul de la prévalence d'inadéquation. L'adéquation des apports en AA a été évaluée au Japon sur des données de 2002-2003 ($n = 230$) et montrent des apports en acides aminés adéquats (Suga *et al.* 2013). En France, l'adéquation des apports en lysine et méthionine a été estimée dans l'enquête INCA1 (1998-1999, $n = 1\,474$) et aucune inadéquation n'a été observée (Martin *et al.* 2004). Enfin, Perignon *et al.* ont également estimé la prévalence d'inadéquation en prenant en compte la qualité des protéines à partir des AAS et de la digestibilité fécale des protéines. En multipliant les AAS corrigés par la digestibilité (PDCAAS, équivalent aux AAS multipliés par la digestibilité des protéines) des régimes individuels par les apports protéiques, les auteurs ont estimé que la prévalence « corrigée » par la qualité était de 4,5% (2,1% pour les hommes et 6,2% pour les femmes) (Perignon *et al.* 2018). Cette approche est discutable, car elle revient, pour les protéines de bonne qualité, à comparer les apports corrigés de la digestibilité des protéines (environ 95%) aux besoins, qui prennent déjà en compte la digestibilité des protéines de bonne qualité.

On peut donc conclure que les apports en protéines sont vraisemblablement adéquats dans les populations occidentales adultes, même pour les populations consommant une part élevée de protéines végétales (à part dans une étude au Royaume-Uni). Cependant, il n'y a pas d'études évaluant la prévalence d'inadéquation en protéines en prenant en compte la digestibilité et les profils en acides aminés des protéines dans des populations consommant une forte part de protéines végétales.

- **Apports nutritionnels**

Au-delà des apports en protéines, la question du lien entre consommation de protéines animales et végétales et adéquation nutritionnelle se pose pour l'ensemble des nutriments, y compris les nutriments dit « préoccupants » car consommés à des niveaux insuffisants : le calcium, la vitamine D, le potassium, les fibres, le fer et les folates, ainsi que les acides gras (saturés ou polyinsaturés) (U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture 2015). D'autres nutriments directement liés à l'origine animale ou végétale des produits, comme la vitamine B12, sont à considérer.

Phillips *et al.* ont analysé le profil nutritionnel des aliments sources de protéines, ainsi que la contribution de ces aliments aux apports nutritionnels aux Etats-Unis (Phillips *et al.* 2015). Les différentes viandes contribuaient plus aux apports en protéines, zinc, vitamine B12, phosphore et fer que les sources de protéines végétales. Dans le détail, ils ont observé que le bœuf maigre (<9,3g de lipides/100g) était un des contributeurs les plus importants aux apports en protéines (14-15%), mais aussi en vitamine B12, fer et potassium, tout en étant un faible

contributeur (<4%) aux apports énergétiques, en lipides totaux et acides gras saturés (AGS). De même, le lait et les produits laitiers étaient les principaux contributeurs aux apports en vitamine D, en calcium, vitamine B12, vitamine A et phosphore. En revanche, les sources de protéines végétales contribuaient plus aux apports en fibres, vitamine E, magnésium et acides gras polyinsaturés que les sources de protéines animales (**Figure 8**).

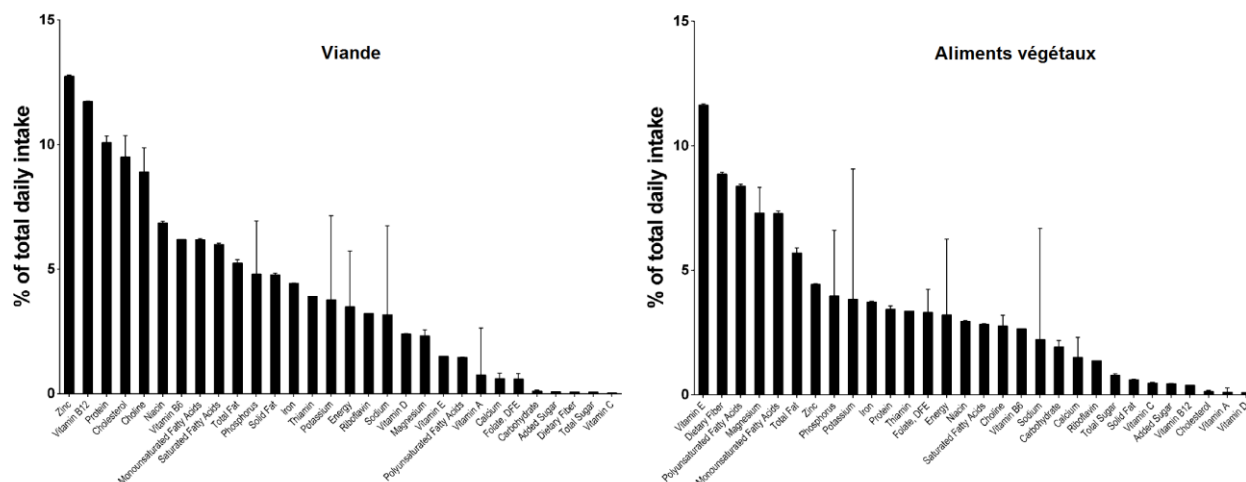


Figure 8. Contribution aux apports nutritionnels des américains des viandes et aliments végétaux dans l'étude NHANES (2007-2010, $n=11\,296$)

(adapté de Phillips et al. 2015)

En France, l'Anses a analysé les principaux contributeurs aux différents apports nutritionnels dans l'étude INCA2 (2006-2007, $n = 1\,912$), ainsi que les aliments ayant les teneurs les plus élevées, dans le cadre de l'élaboration des références nutritionnelles (Anses 2016a). La viande hors volaille était un contributeur majeur aux apports en fer, zinc et vitamine B12, comme la charcuterie, qui était également un fort contributeur aux apports en AGS et sodium. Les produits laitiers contribuaient fortement aux apports en vitamine B12, folates, zinc et calcium, mais aussi en AGS et sodium. Le poisson contribuait aux apports en vitamine B12 et surtout en $\omega 3$ à longues chaînes. Le pain et les produits céréaliers étaient de forts contributeurs aux apports en fibres et folates, mais aussi en sodium et les légumes contribuaient de façon importante aux apports en fibres et folates (**Figure 9**). Les légumineuses étaient de faibles contributeurs aux apports nutritionnels car faiblement consommés, malgré leurs teneurs élevées en protéines, fibres, folates, calcium ou zinc.

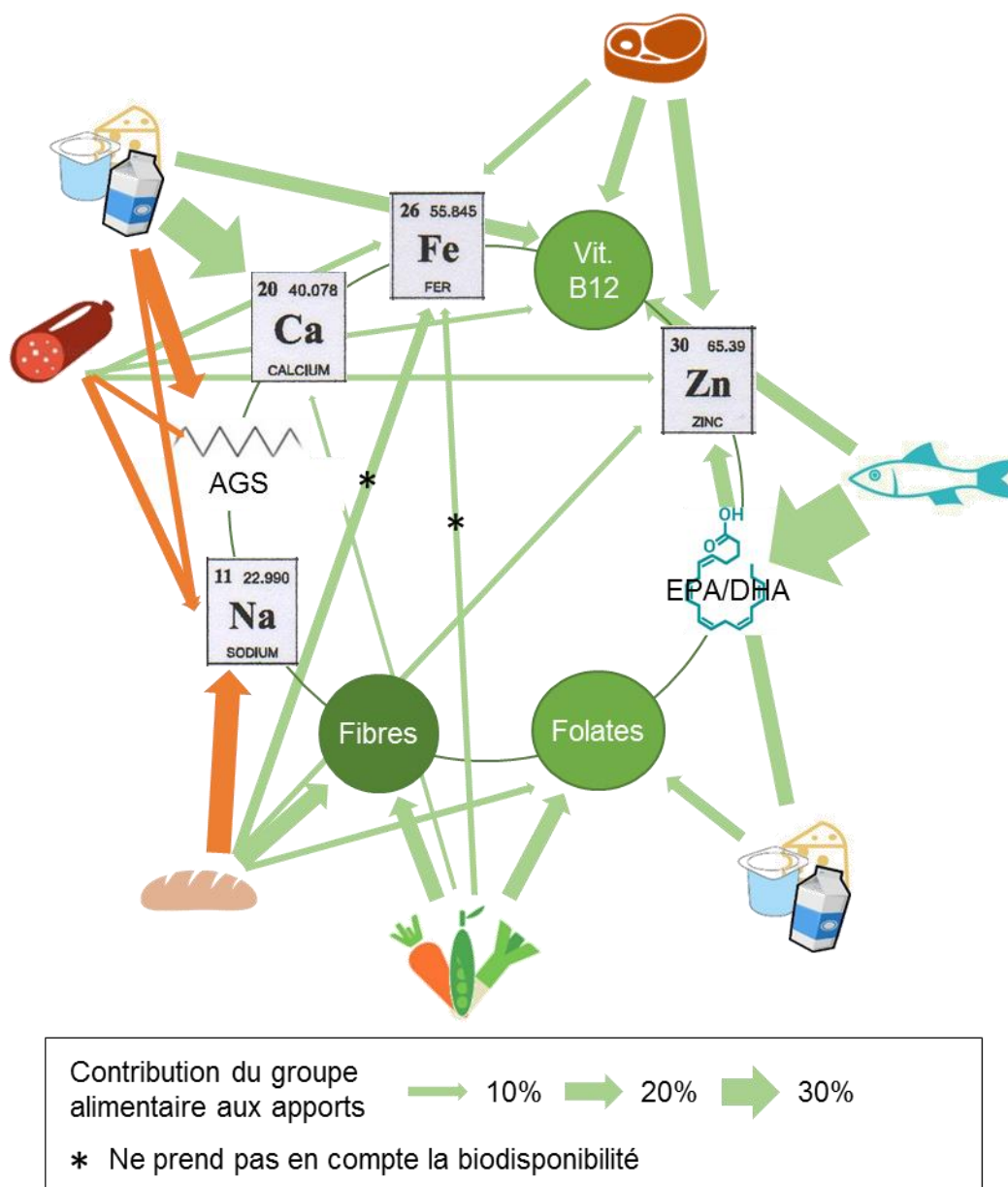


Figure 9. Contribution des principaux groupes alimentaires protéiques aux apports en quelques nutriments dans l'enquête INCA2 ($n=1\ 912$).

Les produits laitiers sont représentés deux fois sur la figure, pour ne pas trop charger la figure.

(d'après les données de Anses 2016a)

L'adéquation nutritionnelle globale, déterminée à partir du score PANDiet, était associée à la quantité de protéines végétales dans l'enquête INCA2 (2006-2007, $n = 1\ 912$), mais pas à la quantité de protéines animales (Camilleri *et al.* 2013). Les œufs, les abats, la viande transformée et le fromage étaient associés négativement au PANDiet, au contraire du poisson, du lait, des yaourts, des céréales et des légumineuses. En comparant des populations à différents niveaux d'apports en protéines végétales dans la cohorte Adventiste (2002-2007, $n = 71\ 751$), Rizzo *et al.* ont identifié que les individus suivant des régimes flexitariens ou

végétariens avaient des apports en fibres supérieurs et des apports en AGS et acide eicosapentaénoïque (EPA) et acide docosahexaénoïque (DHA) inférieurs aux non-végétariens (Rizzo *et al.* 2013). Sobiecki *et al.* ont évalué les apports et les prévalences d'inadéquation d'apports en comparant les omnivores, pesco-végétariens, végétariens et végétaliens de l'étude EPIC-Oxford (1993-1999, $n = 30\,251$) (Sobiecki *et al.* 2016). Les omnivores avaient des apports en fibres et AGPI inférieurs aux autres groupes et des apports en AGS supérieurs aux autres groupes. La prévalence d'inadéquation des apports en folates était plus élevée chez les omnivores par rapport aux autres groupes, au contraire de la vitamine B12, du calcium, du fer et du zinc. Enfin, en France, Allès *et al.* ont évalué les prévalences d'inadéquation en divers nutriments de végétaliens, végétariens et omnivores dans l'étude NutriNet-Santé (2009-2015, $n = 93\,823$). Pour les hommes de moins de 65 ans et les femmes de moins de 55 ans, la prévalence d'inadéquation était plus élevée chez les omnivores que chez les végétariens et végétaliens pour les folates et les fibres, au contraire de la vitamine B12 et du zinc (Allès *et al.* 2017).

Cependant, à part Sobiecki *et al.*, ces évaluations ne prenaient pas en compte les différences de biodisponibilité des sources de protéines animales et végétales, notamment pour le fer et le zinc. En effet, le fer se présente sous deux formes différentes dans les aliments : le fer héminique (surtout dans la viande rouge) et non-héminique (dans le reste des aliments animaux et les végétaux). Le fer héminique est absorbé à hauteur de 25%, alors que le fer non-héminique est absorbé à hauteur de 5%. Ainsi, le fer héminique ne contribue qu'à 10-15% des apports en fer total, mais à plus de 40% des apports en fer absorbé (Moretti 2017). De plus, la biodisponibilité du fer non-héminique est très variable et dépend de nombreux facteurs alimentaires qui peuvent augmenter ou diminuer l'absorption. Armah *et al.* ont analysé les données de la littérature et développé un algorithme permettant de prédire l'absorption du fer non-héminique à partir de ces facteurs (Armah *et al.* 2013) :

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

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

Ainsi l'absorption du fer non-héminique est augmentée en cas de faible taux de ferritine sérique et/ou de faibles apports en fer non-héminique. Elle augmente également avec les apports en vitamine C et en viande, poisson et poulet. Au contraire, l'absorption diminue avec la consommation de polyphénols (donc de thé), de phytates et de calcium. Les phytates étant présents dans l'enveloppe ou le son des céréales et légumineuses, la consommation de ces protéines végétales diminue donc l'absorption du fer.

De même l'absorption du zinc est dépendante de la quantité de phytates dans les régimes, comme modélisée par Miller *et al.* (Miller *et al.* 2007) :

$$TAZ = 0.5 \times \left\{ 0.13 + TDZ + 0.10 \left(1 + \frac{TDP}{1.2} \right) - \sqrt{\left(0.13 + TDZ + 0.10 \left(1 + \frac{TDP}{1.2} \right) \right)^2 - 4 \times 0.13 \times TDZ} \right\}$$

où TAZ est le zinc absorbé (mmol), TDZ le zinc alimentaire (mmol) et TDP les phytates alimentaires (mmol).

Perignon *et al.* ont estimé les apports en fer et zinc de la population INCA2 (2006-2007, $n = 1\,899$) et les probabilités d'adéquation, en prenant en compte ou non la biodisponibilité. Ils ont montré que les prévalences d'inadéquation n'étaient pas les mêmes si on prenait en compte la biodisponibilité. Le rapport protéines animales/protéines végétales était associé à la biodisponibilité en fer et en zinc ($P < 0,01$), mais était un prédicteur moyen pour le fer ($R^2 = 0,168$) et faible pour le zinc ($R^2 = 0,016$) (Perignon *et al.* 2018).

On pourrait donc être amené à penser qu'une évolution des régimes vers plus de protéines végétales engendrerait une meilleure adéquation des régimes aux besoins en fibres, folates et AGS et une moins bonne adéquation des régimes aux besoins en fer, zinc, calcium, vitamine B12 et $\omega 3$ à longue chaîne. Cependant, la société américaine de diététique a publié un avis en 2009 selon lequel des régimes végétariens ou végétaliens étaient bons pour la santé et nutritionnellement adéquats, dans la mesure où ils étaient planifiés de façon appropriée et associés à la consommation d'aliments enrichis ou de compléments alimentaires pour certains nutriments (American Dietetic Association 2009). De même, le Comité consultatif américain sur les repères de consommation (*US Dietary Guidelines Advisory Committee*) a considéré deux exemples de régimes équilibrés ayant des apports nutritionnels adéquats : le régime méditerranéen et le régime végétarien (U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture 2015).

- **Sécurité sanitaire**

Les sources de protéines animales et végétales différant grandement par leur mode de production, on retrouve des contaminants différents en fonction du produit, amenant à des niveaux de risques différents. Au niveau des risques bactériologiques, les produits d'origine animale sont responsables en grande majorité des toxi-infections alimentaires collectives (TIAC). Entre 2006 et 2008, sur les 3 127 TIAC déclarées en France, les aliments responsables ont été identifiés pour 1 796. 1 218 ont été causées par des denrées d'origine animale (558 par des plats cuisinés et aliments d'origine mixte). Les œufs et préparations à base d'œufs étaient responsables de 40% et les produits de charcuterie de 10% des TIAC par salmonelle. Les viandes étaient responsables de 21% des TIAC par *C. perfringens* et 10% des TIAC par *B. cereus*. Les poissons étaient responsables de 94% des TIAC par histamine, et les coquillages de 37% des TIAC par virus. Les aliments sources de protéines végétales n'ont pas été identifiés comme responsables de TIAC de façon isolée, la provenance des agents infectieux dans les plats cuisinés et aliments d'origine mixte ne pouvant être établie (Delmas *et al.* 2010).

Au niveau des risques chimiques, dans la deuxième étude de l'alimentation totale française (EAT2), un risque n'a pas pu être écarté concernant l'exposition à certains contaminants : des contaminants inorganiques (cadmium, aluminium, plomb, arsenic inorganique et méthylmercure), les dioxines et polychlorobiphényles (PCB), certaines mycotoxines (Déoxynivalénol et composés acétylés (DON)), un pesticide (le diméthoate), les sulfites et l'acrylamide (Anses 2011b). Quelques groupes alimentaires seulement étaient des contributeurs majeurs de l'exposition des adultes à ces substances. En effet, le pain était le principal contributeur de l'exposition au cadmium (22%), plomb (13%) et DON (60%) et les légumes le principal contributeur à l'exposition à l'aluminium (11%). Les poissons, quant à eux, contribuaient majoritairement à l'exposition aux dioxines (20%) et PCB (37%), au méthylmercure (69%) et à l'arsenic (30%). Cependant, en considérant d'éventuels effets négatifs du poisson liés aux contaminants présents, Mozaffarian et Rimm ont conclu que le rapport bénéfice-risque d'une consommation de poisson limitée à une ou deux fois par semaine était positif, au regard des apports nutritionnels et particulièrement en $\omega 3$ à longue chaîne (Mozaffarian et Rimm 2006). C'est également la conclusion de l'Anses dans son rapport sur l'établissement des repères du PNNS, qui conseille de « *consommer deux portions de poisson par semaine, dont une à forte teneur en EPA et DHA, en variant les espèces et les lieux d'approvisionnement, pour des apports nutritionnels adéquats et un risque limité lié à l'exposition aux contaminants* » (Anses 2016c). Les cerises avaient été identifiées comme contributeur presque exclusif à l'exposition au diméthoate, mais ce pesticide a été interdit

depuis. Une évolution des consommations de sources de protéines amènerait donc potentiellement à une modification du risque lié à l'exposition à ces substances.

Les études s'intéressant à l'exposition aux contaminants en lien avec les régimes durables (selon différents critères) sont rares. L'Anses, dans l'élaboration des repères de consommation alimentaire, a intégré l'exposition aux contaminants comme une contrainte dans l'optimisation des consommations alimentaires visant à avoir des apports nutritionnels adéquats. Un régime optimisé, base des repères alimentaires, a pu donc être modélisé tout en garantissant une exposition aux contaminants inférieure aux valeurs toxicologiques de référence (VTR), quand elles étaient disponibles, ou à la médiane d'exposition dans INCA2 (quand il n'y avait pas de VTR disponible). Cependant, l'exposition à certains contaminants, comme l'acrylamide et le plomb, reste à un niveau jugé « *préoccupant* » (Anses 2016c). Barré *et al.* ont également optimisé des régimes moyens pour identifier des régimes adéquats nutritionnellement, en contraignant ou non l'exposition moyenne aux contaminants à rester inférieure aux VTR ou inférieure à l'exposition observée dans INCA2 (2006-2007, $n = 1\,918$) (Barré *et al.* 2016). Le risque lié à l'exposition aux contaminants n'a pas été évalué dans cette étude. Le régime optimisé qui assure une adéquation nutritionnelle et une exposition inférieure ou égale à l'exposition observée comportait plus de féculents non raffinés, d'œufs et de poisson et moins de thé, café et boissons alcoolisées que le régime sans contrainte d'exposition aux contaminants. Fleury *et al.* ont évalué l'exposition aux contaminants des végétariens de l'étude NutriNet-Santé (2014, $n = 1\,766$) (Fleury *et al.* 2017). Ils ont conclu que l'exposition aux polluants organiques persistants (PCB, dioxines et furanes) était inférieure chez les végétariens, par rapport à la population générale et qu'un risque lié à l'exposition à ces contaminants était exclu pour les végétariens. Au contraire, des risques supérieurs liés à l'exposition à quelques contaminants inorganiques (Cd, Al, Mg et Ni) ont été évalués chez les végétariens, par rapport à la population générale. Pour les mycotoxines T2 et HT2, l'exposition était supérieure chez les végétariens par rapport à la population générale, mais le risque identifié était similaire pour les deux populations. Les auteurs concluent donc que les habitudes alimentaires peuvent grandement influencer l'exposition aux contaminants (Fleury *et al.* 2017).

2.2. Sources de protéines et maladies chroniques

L'adéquation aux besoins nutritionnels est un indicateur de la qualité des régimes, mais tous les nutriments n'ont pas les mêmes effets sur la santé. Au-delà de l'adéquation nutritionnelle, il est donc important de s'intéresser à l'effet de la consommation de sources de protéines animales et végétales sur la santé et le développement de maladies chroniques. Willett *et al.*, dans leur rapport visant à définir un régime alimentaire durable, ont résumé les données récentes concernant les effets sur la santé de la consommation des sources de protéines (Willett *et al.* 2019). De même, Godfray *et al.* ont analysé le lien entre la consommation de viande, la santé et l'environnement et ont effectué une analyse similaire (Godfray *et al.* 2018) (**Figure 10**). Enfin, l'Anses a publié en 2016 un rapport concernant les relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles (Anses 2016b). On ne s'intéressera dans cette partie qu'aux événements de santé pour lesquels les liens avec la consommation de sources de protéines sont le plus documentés : la mortalité totale, les maladies cardiovasculaires (MCV), les cancers et le diabète de type 2.

- **Mortalité totale et cardiovasculaire**

L'association entre consommation de sources de protéines et mortalité totale ou cardiovasculaire a été largement étudiée (Mariotti 2019). L'Anses a conclu à un degré de certitude « probable » sur le lien entre consommation de viande rouge (transformée ou non) et augmentation du risque de maladies cardiovasculaires. Une méta-analyse récente a également montré une association positive entre la consommation de viande transformée et la mortalité totale et cardiovasculaire et entre la consommation de viande rouge et la mortalité cardiovasculaire, avec un effet de seuil à 50g/j pour la viande transformée et à 100g/j pour la viande rouge (Abete *et al.* 2014). D'autres études de cohorte ont montré une association similaire, mais linéaire et donc sans effet de seuil (Etemadi *et al.* 2017; Pan *et al.* 2012; Sinha *et al.* 2009). Substituer de la viande rouge (transformée ou non) par d'autres sources de protéines (viande blanche, poisson et protéines végétales) a également été associé à une moindre mortalité dans ces études. Rohrmann *et al.* ont estimé, à partir des données de la cohorte EPIC, que 3,3% de la mortalité totale pourrait être évitée si tous les participants limitaient leur consommation de viande transformée à 20g/j (Rohrmann *et al.* 2013). De même, des modèles ont estimé que la transition de régimes à forte consommation de viande vers des régimes plus végétariens réduirait la mortalité totale entre 6 à 10%, en fonction des régimes considérés (Springmann *et al.* 2016).

La consommation de volaille n'a pas été associée au risque de mortalité ou de maladies chroniques dans les études citées précédemment. Concernant les produits laitiers, l'Anses n'a

pas conclu à un effet causal vis-à-vis des MCV. De même, dans une méta-analyse récente, il n'a pas été démontré d'association entre les produits laitiers et la mortalité totale ou cardiovasculaire (Guo *et al.* 2017). L'Anses a conclu en 2016 à un degré de certitude « probable » sur l'association négative entre consommation de poisson et risque d'accident vasculaire cérébral. De même, Mozaffarian *et al.* ont conclu que des consommations de l'ordre de une ou deux fois par semaine de poisson réduisaient le risque de décès par maladie coronarienne de 36% et de mortalité totale de 17% (Mozaffarian et Rimm 2006). Zheng *et al.* ont identifié des effets du même ordre (Zheng *et al.* 2012). La consommation de fruits à coque n'était pas associée de façon concluante à la mortalité cardiovasculaire selon l'Anses. Cependant, des méta-analyses récentes montrent de façon cohérente une association négative entre consommation de noix et mortalité par cardiopathies ischémiques (Afshin *et al.* 2014), la mortalité totale et la mortalité cardiovasculaire (Aune *et al.* 2016; Bao *et al.* 2013; Mayhew *et al.* 2016). L'Anses n'a pas conclu sur les relations entre consommation de légumineuses et mortalité totale et cardiovasculaire, mais des méta-analyses récentes ont montré une réduction du risque lié à la consommation de légumineuses (Afshin *et al.* 2014). Enfin, les céréales complètes contribuent à réduire le risque de MCV comme démontré par une méta-analyse de 2016 (RR= 0,84 pour la mortalité totale, $P < 0,001$ et RR=0,82 pour la mortalité par MCV, $P < 0,001$) (Zong *et al.* 2016). L'Anses a également conclu à une association négative probable entre consommation de céréales complètes et MCV.

Au global, les régimes végétariens et flexitariens ont été associés à une moindre mortalité totale que les régimes omnivores (-12%) (Orlich *et al.* 2013). Des approches basées sur des indices de végétalisation de l'alimentation ont montré que des régimes plus végétaux, particulièrement basés sur des aliments végétaux sains (céréales complètes, fruits et légumes, noix et graines, huiles et thé/café) étaient associés négativement au risque de maladies coronariennes (Satija *et al.* 2017). Au sein d'une population Adventiste (2002-2007, $n = 81\ 337$), le profil de consommation « viande » était associé positivement (HR = 1,61, $P < 0,001$) et le profil « noix et graines » négativement (HR = 0,60, $P < 0,001$) à la mortalité cardiovasculaire (Tharrey *et al.* 2018). Les résultats d'une étude récente sur deux grandes cohortes américaines (Nurse Health Study et Health Professionals Follow-up Study, 131 342 participants entre 1980 et 2012) ont montré une association positive entre les protéines animales consommées et la mortalité cardiovasculaire (HR = 1,08 pour 10% d'énergie apportée par les protéines animales supplémentaires, $P < 0,04$) et négative entre la quantité de protéines végétales et la mortalité toutes causes (HR = 0,90 pour 3% d'énergie supplémentaire, $P < 0,001$) et la mortalité cardiovasculaire (HR = 0,88 pour 3% d'énergie supplémentaire, $P = 0,007$), pour les individus ayant au moins un facteur de risque pour ces maladies (Song *et al.* 2016). De même, au Japon, dans une cohorte de 7 744 adultes, la

consommation de protéines végétales était associée négativement à la mortalité cardiovasculaire (HR = 0,86 pour 1% d'énergie supplémentaire, $P < 0,05$) (Kurihara *et al.* 2019).

- **Cancer colorectal et cancer de la prostate**

La consommation de viande rouge transformée a été classée cancérogène certain (groupe 1) par le Centre international de recherche sur le Cancer (CIRC), du fait de son association avec le cancer colorectal (Norat *et al.* 2005) (**Figure 10**). La viande rouge, quant à elle, a été classée cancérogène probable (groupe 2), du fait d'un niveau de preuve plus limité. L'Anses a conclu à un niveau de preuve « convaincant » sur le lien entre consommation de viande rouge (transformée ou non) et augmentation du risque de cancer colorectal.

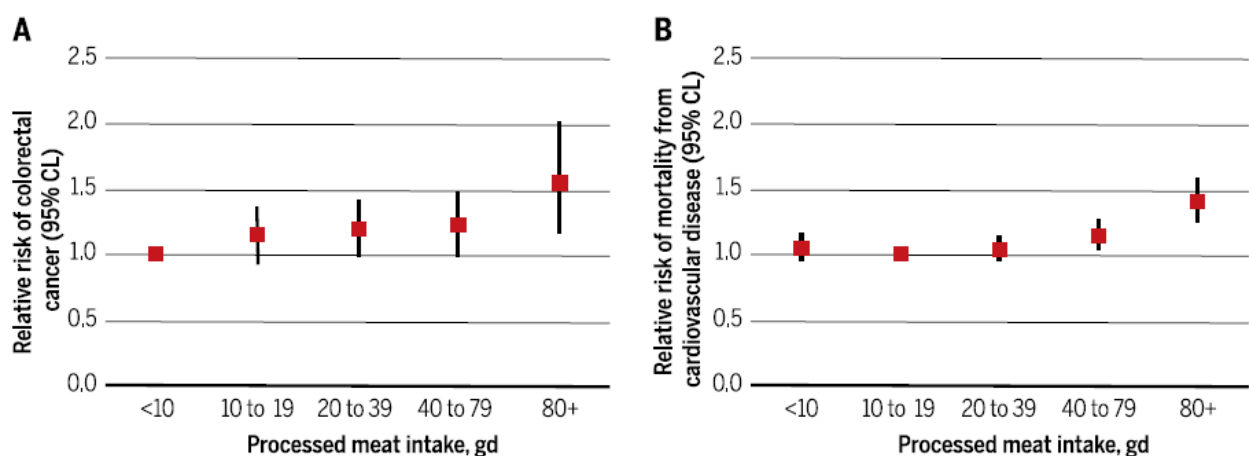


Figure 10. Risques relatifs liés à la consommation de viande transformée pour le cancer colorectal (A) et les maladies cardiovasculaires (B)

(extrait de Godfray *et al.* 2018, d'après Norat *et al.* 2005 et Rohrmann *et al.* 2013)

Une forte consommation de lait a été associée à un risque réduit de cancer colorectal (WCRF/AICR 2007), mais à une augmentation du risque de cancer de la prostate (Guo *et al.* 2017). De même, l'Anses a conclu en 2016 à un degré de certitude « probable » sur l'association entre consommation de lait et réduction du risque de cancer colorectal, tout en précisant que les données concernant l'association entre consommation de produits laitiers et augmentation du risque de cancer de la prostate « *suggéraient une relation, mais étaient insuffisantes pour conclure à une relation causale* ». Les produits céréaliers complets ont été associés à une réduction de risque de cancer colorectal (Aune *et al.* 2011), de façon « probable » selon l'Anses et avec un niveau de preuve élevé selon le WCRF (WCRF/AICR 2007). Une méta-analyse de 2016 démontre également cette association (RR = 0,88 en comparant les catégories extrêmes) (Zong *et al.* 2016). D'autres relations ont été identifiées entre consommation de sources de protéines et cancers, mais à des niveaux de preuves plus

limités et sans consensus pour le moment (Diallo *et al.* 2018). En France, un score pro-végétarien a été associé négativement à la survenue de cancer totaux dans la cohorte NutriNet-Santé (2009-2016, n = 42 544), ainsi qu'aux cancers digestifs et au cancer du poumon (Kane-Diallo *et al.* 2018).

- **Diabète de type 2**

La consommation de protéines a été associée positivement ou négativement au diabète de type 2 en fonction du type de protéine ou de l'aliment protéique considéré (Mariotti 2019). L'Anses a identifié que les consommations de viande transformée et/ou de viande hors volaille « *paraissent associé(e)s à une augmentation du risque de diabète* » (Anses 2016b). Une méta-analyse a démontré une association positive entre consommation de viande rouge (RR = 1,15 pour 100g supplémentaires), de viande rouge transformée (RR = 1,32 pour 50g supplémentaires) et risque de diabète de type 2 (Feskens *et al.* 2013). De même, Pan *et al.* ont montré une association positive entre consommation de viande rouge (RR = 1,19 pour 100g), de viande rouge transformée (RR = 1,51 pour 50g) et risque de diabète de type 2 (Pan *et al.* 2011). Une méta-analyse récente a mis en évidence une association négative entre consommation de yaourt et diabète de type 2 (RR=0,82 pour une portion/jour) (Chen *et al.* 2014), mais aucune association avec les autres types de produits laitiers. L'Anses a considéré cette association « probable », comme celle concernant les céréales complètes, ce qui est démontré par une méta-analyse (RR = 0,74 entre comparant le groupes à la plus forte consommation au groupe à la plus faible) (Ye *et al.* 2012). L'Anses n'avait pas conclu sur le lien entre consommation de noix et le développement d'un diabète, mais une méta-analyse a montré une réduction du risque de mortalité liée au diabète (RR=0,61 pour 28g/j supplémentaires) en 2016 (Aune *et al.* 2016). Ces résultats ont été repris par Schwingshackl *et al.* dans une revue de la littérature récente. Ils concluent pour l'association entre diabète de type 2 et consommations alimentaires à un niveau de preuve « faible » pour les légumineuses et les noix ; « modéré » pour les céréales raffinées, les légumes, les fruits, les œufs, les produits laitiers et le poisson ; et « élevé » pour la viande transformée, la viande rouge, les céréales complètes et les boissons sucrées (Schwingshackl *et al.* 2017).

Au global, dans la cohorte EPIC, la quantité de protéines totales était associée au diabète de type 2 (HR = 1,06 pour 10g supplémentaires, P<0,001), ainsi que la quantité de protéines animales (HR = 1,05 pour 10g supplémentaires, P<0,001) (van Nielen *et al.* 2014). Des résultats similaires ont été observés aux Etats-Unis, mais les protéines végétales étaient négativement associées au diabète de type 2 (Malik *et al.* 2016). Les scores de végétalisation de l'alimentation développés par Satija *et al.* ont été également négativement associés à l'incidence du diabète de type 2, particulièrement le score « sain » hPDI où la consommation

d'aliment végétaux sains était notée positivement et celle d'aliments végétaux « malsains » négativement, même après ajustement par l'indice de masse corporelle (IMC) des individus (HR = 0,66 pour les déciles extrêmes, $P < 0,001$) (Satija *et al.* 2016).

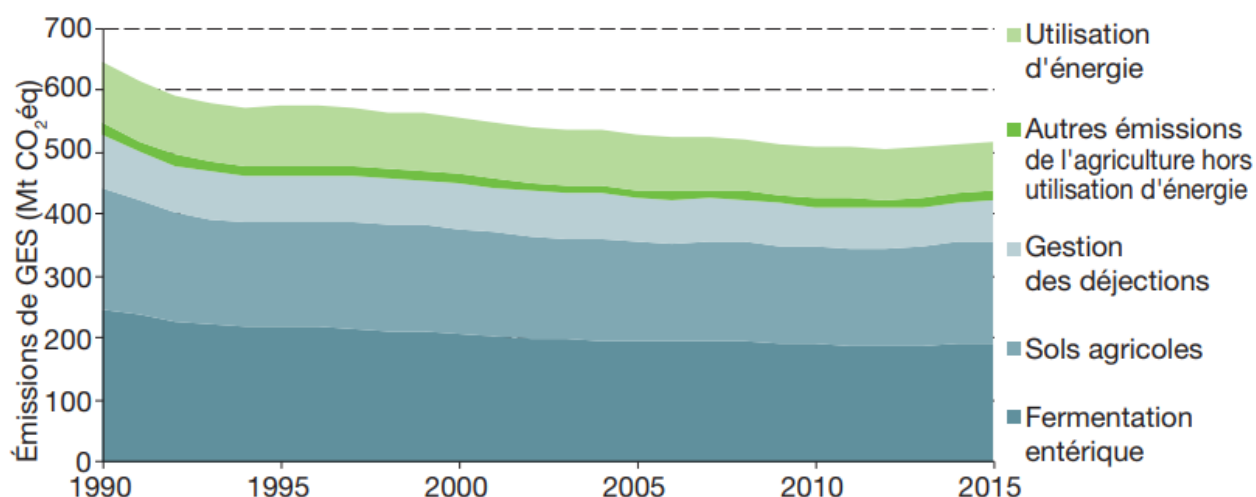
2.3. Sources de protéines et impacts sur l'environnement

L'INRA a publié en 2016 une expertise collective sur l'élevage et notamment ses impacts sur l'environnement (Dumont *et al.* 2016). Les conclusions de cette expertise seront reprises ici, ainsi que d'autres sources plus récentes. En France, l'outil AGRIBALYSE a été développé pour évaluer l'impact de la production agricole sur différents paramètres environnementaux à partir d'analyses de cycle de vie (ACV) (Colomb *et al.* 2015).

- **Emissions de gaz à effet de serre**

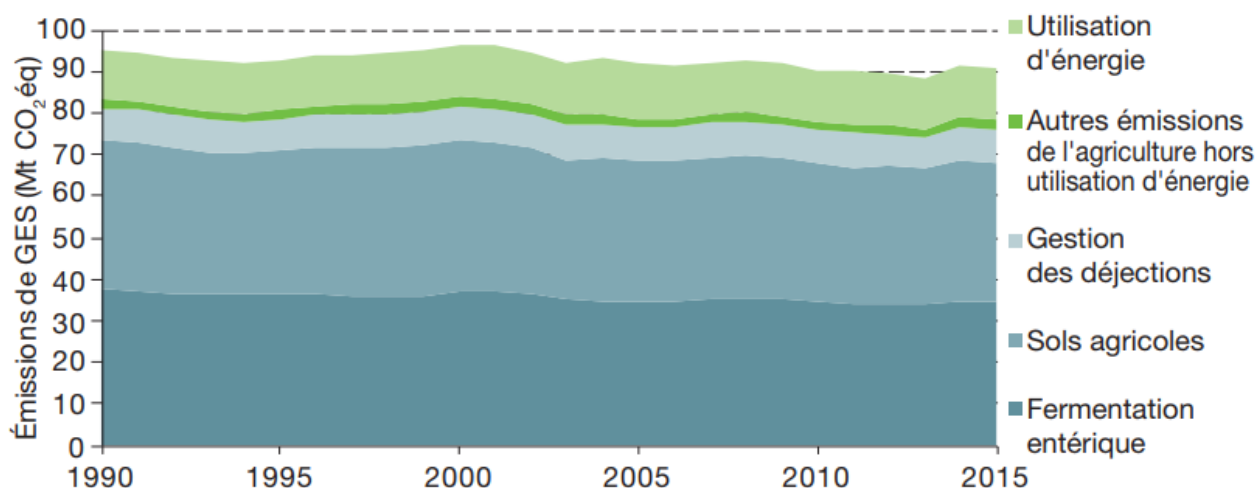
La production alimentaire contribue aux émissions de gaz à effet de serre (GES) (CO_2 , méthane ou protoxyde d'azote) à travers l'élevage (alimentation animale et méthane émis par la digestion des ruminants), l'utilisation des sols (conversion des forêts et prairies en terres cultivées, labour, fertilisation azotée), le transport et la transformation. En compilant les données de rapports récents, Willet *et al.* ont estimé que les émissions de GES du secteur agricole mondial étaient comprises entre 8,5 et 13,7 Gt eq CO_2 / an et étaient stables depuis 1990, les hausses de production étant compensées par les baisses d'émissions par unité de production (Willet *et al.* 2019). Un des rapports cités estime les émissions de GES de l'agriculture, la foresterie et l'affectation des terres à 10-12 Gt eq CO_2 / an, soit 25% des émissions liées aux activités humaines. D'après la FAO, l'élevage contribue en grande majorité aux émissions de GES du secteur de la production alimentaire. En effet, dans son rapport sur le changement climatique et l'élevage de 2013, l'organisme a estimé que l'élevage était responsable de l'émission de 7,1 Gt eq CO_2 / an, soit 14,5 % des émissions de GES liées aux activités humaines (Gerber *et al.* 2013). Le secteur bovin est le principal contributeur aux émissions de GES du secteur de l'élevage avec 41% des émissions pour la production de viande bovine et 20% pour la production de lait. Les émissions de GES de l'élevage sont liées principalement à la production et à la transformation des aliments pour bétail (45%, y compris 9% en lien avec la conversion des forêts en zones cultivées) et à la fermentation entérique des ruminants (39%). La consommation d'énergies fossiles contribue à 20% des émissions du secteur. Les émissions dépendent largement des modes de production et donc des pays considérés. Par exemple, dans l'Union Européenne à 28, l'agriculture, la foresterie et l'affectation des terres ont contribué à environ 12% des émissions de GES en 2015, en comptabilisant l'utilisation d'énergie liée à ce secteur (CGDD 2018). Ce chiffre est d'environ 20% pour la France en 2015, de par l'importance du secteur agricole dans le pays. Les émissions sont principalement dues au méthane émis par la fermentation entérique (38% du secteur agricole) et aux sols agricoles (37%), par l'émission de protoxyde d'azote (**Figure 11**).

ÉMISSIONS DE GES DE L'AGRICULTURE DANS L'UE



Source : AEE, 2017

ÉMISSIONS DE GES DE L'AGRICULTURE EN FRANCE (DOM INCLUS)



Source : Citepa, 2017

Figure 11. Emissions de gaz à effet de serre liées à l'agriculture, la foresterie et l'affectation des terres dans l'UE et en France entre 1990 et 2015

(extrait de CGDD 2018, d'après les données AEE et Citepa)

La question des différences d'usage des sols pour produire des aliments végétaux ou animaux est centrale dans la discussion sur les perspectives d'évolutions de consommation, ainsi que sur les émissions de GES. En effet, l'alimentation de l'élevage, particulièrement l'élevage bovin, utilise peu d'aliments utilisables directement par l'Homme et stimule le stockage de carbone dans les sols. L'alimentation bovine valorise les coproduits céréaliers et l'herbe des prairies (parfois non cultivables) et les déjections permettent de stimuler la croissance de l'herbe et la fixation du carbone en fournissant de l'azote (Gerber *et al.* 2013; Henderson *et al.* 2015). Ainsi, les émissions de GES dues aux émissions de méthane et à la part de l'alimentation issue de

céréales consommables par l'Homme sont en partie compensées par le fait que les pâturages stockent plus de carbone que les champs utilisés pour produire des protéines végétales. Cependant, le pâturage intensif peut provoquer de l'érosion et des émissions de protoxyde d'azote à cause des déjections azotées en trop grande quantité. Godfray *et al.* ont conclu, en analysant les données récentes de la littérature, que les bénéfices liés au stockage de carbone étaient liés à des spécificités locales et qu'ils étaient globalement faibles au regard des émissions liées aux productions d'aliments animaux (Godfray *et al.* 2018; Henderson *et al.* 2015). Dans l'UE à 28, d'après le CGDD, les cultures ont émis 65 Mt eqCO₂ et les prairies 4 Mt eqCO₂ en 2015. En France, les cultures ont émis 18 Mt eqCO₂ et les prairies ont stocké 11 Mt eqCO₂ en 2015. Par conséquent, même en considérant que les prairies étaient à 100% pâturées, le carbone stocké reste faible, ne serait-ce que par rapport aux émissions liées à la fermentation entérique (35 Mt eqCO₂). L'INRA conclut donc que *« l'élevage a un impact clairement négatif sur le réchauffement climatique et sur la qualité de l'air, de par sa contribution importante aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre, notamment le méthane »*, et que *« la production de viande issue des ruminants émet plus de GES par unité de protéine produite que les monogastriques »*. Ces résultats sont confirmés par les données d'AGRIBALYSE, qui montrent que les émissions de GES par kg de produit sont les plus élevées pour la viande bovine, suivies par les autres viandes, les œufs et produits laitiers et les produits végétaux (**Figure 12**). Il existe cependant des différences en fonction du type d'élevage. En effet, les vaches de réforme émettent entre 7 et 8 kg eqCO₂/kg de produit contre 14 à 20 kg eqCO₂ pour les vaches allaitantes (Colomb *et al.* 2015). De même, l'alimentation des bovins, notamment la part d'herbe pâturée, influence largement les émissions de GES liées à la production d'1kg de viande ou produits laitiers (Provenza *et al.* 2019).

- **Usage des sols**

On estime que la production d'aliments animaux utilise environ 75% des surfaces agricoles au niveau mondial, entre surfaces de pâturage et de parcours (91%) et production d'alimentation pour bétail (9%). De même, 35% de la production végétale (en masse) est dirigée vers l'alimentation animale, contre seulement 62% vers l'alimentation humaine, au niveau mondial (Foley *et al.* 2011). En Amérique de Nord et en Europe, 40% de la production agricole est dirigée vers l'alimentation humaine, ce qui démontre que la majorité de la production végétale sert à nourrir les animaux. Ainsi, les terres arables utilisées pour l'alimentation animale entrent en compétition avec la production d'aliments végétaux directement utilisables par l'Homme. Il convient tout de même de nuancer ce bilan, car les prairies pâturées et parcours sont souvent des espaces impropres à la production végétale (montagnes, sols peu fertiles). Les données d'AGRIBALYSE permettent tout de même d'estimer la surface nécessaire à la production d'un

kg de produit et montrent, comme pour les émissions de GES, que la production d'un kg de viande bovine nécessite plus de surface que la production d'un kg d'autres viandes, qui nécessitent plus de surface que les productions végétales (**Figure 12**). Ces valeurs varient également en fonction des systèmes de production, les produits issus de l'agriculture biologique ou « Label rouge » nécessitent plus de surface par kg produit (Colomb *et al.* 2015). La viande et les produits animaux en général ne produisant pas la même quantité de protéines, on peut également rapporter l'occupation des sols à la quantité de protéines produites. Dans ce cas, la production d'un kg de protéines bovines nécessite 144-258 m², contre 47-64 m² pour le porc, 42-52 m² pour le poulet, 33-59 m² pour le lait et 35-48 m² pour les œufs (de Vries et de Boer 2010).

- **Autres paramètres liés à l'environnement**

L'azote (à travers l'ammoniac) et le phosphore sont responsables de l'acidification et l'eutrophisation (développement excessif de biomasse pouvant conduire à une asphyxie du milieu) des milieux naturels. La gestion des effluents d'élevage et les productions végétales nourrissant l'élevage, par lessivage des sols, peuvent engendrer une charge en nutriments des eaux. D'après l'expertise de l'INRA, l'agriculture est responsable d'environ 60% des fuites en azote et 30% des fuites en phosphore vers les milieux aquatiques, de par la fertilisation des cultures par les engrais minéraux ou organiques issus des élevages. Même si les politiques publiques des dernières années ont permis une diminution importante de ce type de pollution, certaines pratiques d'élevage engendrent encore des pertes azotées (Dumont *et al.* 2016). Au niveau de la consommation de ressources énergétiques non-renouvelables, l'élevage valorise faiblement l'énergie investie dans le système (< 1MJ d'énergie alimentaire par MJ d'énergie non consommée). Les productions végétales, quant à elles, produisent entre 1 et 5 MJ par MJ investi dans les systèmes de cultures pour les fruits et légumes et 15MJ pour les grandes cultures. Les données d'AGIBALYSE permettent d'estimer que la viande bovine cause également le plus d'eutrophisation marine et d'acidification (par kg de produit), puis les autres viandes et les productions végétales. On remarque tout de même que certaines cultures affichent un niveau d'eutrophisation comparable à certains produits animaux (oléagineux, légumineuses, certaines céréales). De même, la production d'un kg de viande bovine consomme plus d'énergie non-renouvelable que les autres viandes, mais la consommation d'énergie reste du même ordre de grandeur. On peut tout de même remarquer que la production de tomates conventionnelles sous abris consomme plus d'énergies non-renouvelables par kg que les autres produits (**Figure 12**).

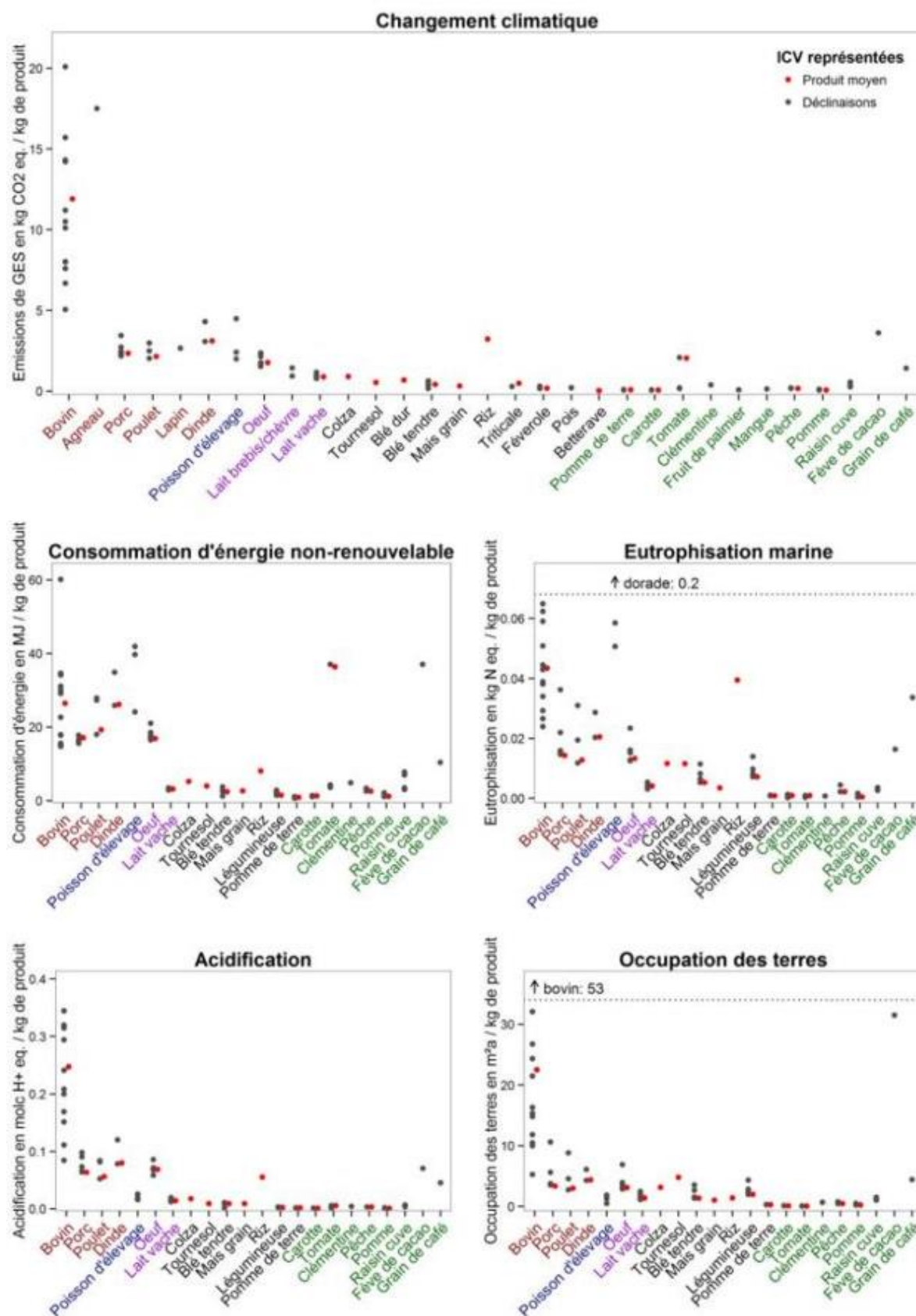


Figure 12. Impact environnemental par kg de produit selon AGRIBALYSE
(extrait de Colomb et al 2015)

Conclusion partielle

Les aliments sources de protéines végétales contiennent moins de protéines, avec une digestibilité légèrement inférieure et des acides aminés limitants pour les céréales et quelques légumineuses, par rapport aux sources de protéines animales. Cependant, les populations consommant le plus de protéines végétales ne semblent pas être en situation de déficience en protéines, même si peu d'études ont analysé les questions de qualité des protéines dans le détail. Les apports nutritionnels étant différents entre sources de protéines animales et végétales, les régimes à forte dominance végétale présentent des prévalences d'inadéquation plus élevées concernant le fer, le zinc, le calcium, la vitamine B12 et les $\omega 3$ à longue chaîne, mais plus faibles concernant les fibres et les folates. Cependant, l'adéquation nutritionnelle globale des régimes est associée positivement à la quantité de protéines végétales consommée. Il y a un consensus selon lequel un régime végétarien peut être nutritionnellement adéquat s'il est correctement planifié, mais peu d'études montrent que ces régimes sont effectivement « correctement planifiés ». Les aliments sources de protéines animales sont majoritairement responsables des toxi-infections alimentaires collectives et sont responsables des risques liés à l'exposition aux dioxines, furanes, PCB, méthylmercure et arsenic inorganique. Les sources de protéines végétales sont associées aux risques liés à l'exposition au plomb, cadmium, nickel ou mycotoxines. La consommation de viande rouge (et particulièrement transformée) est associée positivement à la mortalité totale, cardiovasculaire, au cancer colorectal et au diabète de type 2. La consommation de poisson gras est associée négativement à la mortalité cardiovasculaire. La consommation de céréales complètes, noix et légumineuses est associée négativement à la mortalité cardiovasculaire. Globalement, les régimes à dominante végétale sont associés négativement à la mortalité totale, cardiovasculaire, par cancer et au diabète de type 2, particulièrement pour les régimes basés sur des protéines végétales « saines » (céréales complètes, légumineuses, noix et graines). L'agriculture est responsable d'environ 20% des émissions de GES en France, principalement par la fermentation entérique des ruminants et les émissions de N_2O dues à la fertilisation azotée. La viande bovine est responsable de plus d'émissions de GES, nécessite plus de surface, a un plus fort impact en termes d'acidification et d'eutrophisation et consomme plus d'énergie non-renouvelable que les autres viandes et produits animaux, qui ont plus d'impacts que les productions végétales.

3. Les sources de protéines dans les régimes durables

Jones *et al.* ont effectué en 2016 une revue de la littérature concernant les régimes durables. Ils ont identifié 113 études sur cette thématique, dont 83 études analysant le potentiel de différents régimes à avoir un impact sur la consommation énergétique, le changement climatique, la qualité de l'air, de l'eau, du sol et d'autres services écosystémiques (Jones *et al.* 2016). Les émissions de GES étaient le premier paramètre étudié (63% des études), suivies de l'utilisation des terres (28%) et de la consommation d'aliments animaux (27%). Le coût des régimes n'a été évalué que dans 13 études. Deux types d'approches ont été utilisées pour évaluer les régimes durables : l'identification et la caractérisation de régimes durables dans les consommations observées, et la modélisation, à partir de ces consommations, de régimes maximisant ou optimisant un ou plusieurs paramètres de durabilité. Les conclusions des principales revues de la littérature récentes sur le sujet seront discutées par la suite.

3.1. La durabilité dans les régimes observés

- **Hétérogénéité des études**

Auestad et Fulgoni ont identifié les études concernant les impacts des profils de consommation alimentaire sur au moins un indicateur de durabilité environnementale jusqu'en avril 2014 (Auestad et Fulgoni 2015). Ils ont conclu que les études sur l'association entre régimes alimentaires et le changement climatique étaient globalement peu concluantes, du fait de la variabilité des régimes alimentaires étudiés, la variabilité des méthodes utilisées et du faible nombre d'aliments évalués par ACV (voire d'études limitant les ACV à l'étape de la sortie de ferme). Une autre difficulté était le choix de l'unité de comparaison des régimes : en effet, si la comparaison se faisait en émissions de GES/100g, les sources de protéines animales étaient responsables de 2 à 15 fois plus d'émissions de GES que les fruits et légumes. En revanche, en considérant les émissions en $\text{eqCO}_2/\text{kcal}$, les fruits et légumes étaient responsables d'émissions de GES du même niveau que les plats préparés, le porc, le poulet ou les œufs. La viande de ruminants était responsable de trois fois plus d'émissions de GES que les fruits et légumes dans ce cas (**Figure 13**) (Vieux *et al.* 2013). La plupart des revues de la littérature concluaient également à une hétérogénéité très forte entre les méthodes et indicateurs utilisés dans les différentes études et à des résultats souvent non-cohérents entre les études et donc non généralisables (Hallström *et al.* 2015; Payne *et al.* 2016; Perignon *et al.* 2017).

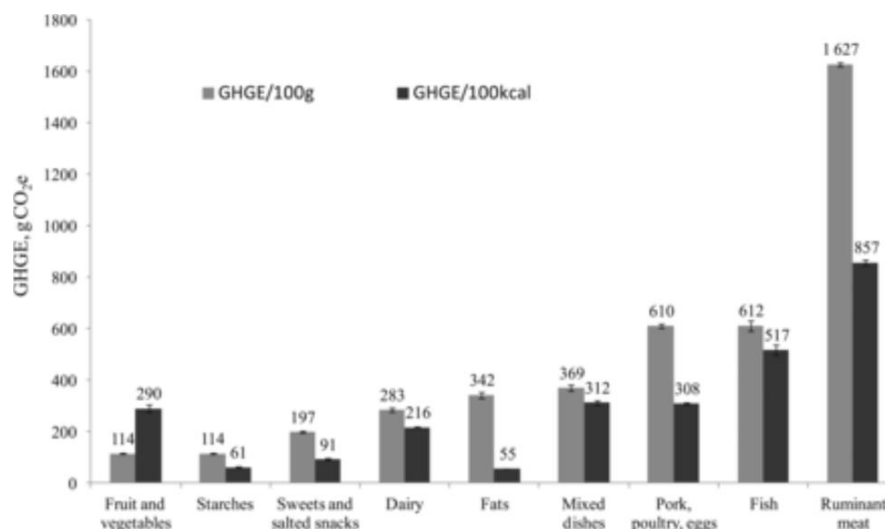


Figure 13. Emissions moyennes de GES liées à la consommation de 100g ou 100kcal de groupes alimentaires chez les adultes de l'étude INCA2 (2006-2007, n=1 918).

(extrait de Vieux et al. 2013)

- **Consommation de sources de protéines et émissions de GES**

En ce qui concerne la consommation de certains groupes alimentaires, Perignon *et al.* ont conclu, après revue de la littérature, qu'une faible consommation de viande et de faibles apports énergétiques étaient les deux principaux facteurs permettant de faibles émissions de GES des régimes. Le type de viande considéré était également crucial, la viande de ruminants contribuant majoritairement aux émissions de GES de l'alimentation (Perignon *et al.* 2017). Dans la cohorte EPIC-Oxford (1993-1999, $n = 55\,504$), Scarborough *et al.* ont évalué les émissions de GES des régimes omnivores (à différents niveaux), pesco-végétariens, végétariens et végétaliens. Ils ont évalué que les émissions de GES liées à l'alimentation étaient graduellement plus faibles en partant des forts consommateurs de viande (7,19 kg eqCO₂/j) jusqu'aux végétaliens (2,89 kg eqCO₂/j) et la consommation de fruits et légumes suivait un gradient inverse (Scarborough *et al.* 2014a). Des conclusions similaires ont été apportées dans la cohorte Adventiste ($n = 73\,308$) par Soret *et al.* En effet, ils ont identifié que le régime flexitarien (ou semi-végétarien) était lié à 22% d'émissions de GES de moins que le régime omnivore (faibles consommateurs de viande dans cette population) et le régime végétarien 29% de moins que le régime omnivore, les omnivores consommant plus de viande et moins d'aliments végétaux que les autres régimes (Soret *et al.* 2014). Dans l'étude citée précédemment de Vieux *et al.*, dans la population française, les émissions de GES étaient associées positivement à la consommation de fruits et légumes, produits laitiers, plats préparés, viande, poisson et surtout de viande de ruminants ($r \approx 0,5$) et négativement à la consommation de féculents, snacks et graisses animales et végétales (Vieux *et al.* 2013). Enfin, dans la cohorte (NutriNet-Santé, 2014, $n = 34\,193$), Seconda *et al.* ont montré que le quintile

de la population qui émettait le moins de GES était caractérisé par une faible consommation de viande rouge et une forte consommation de fruits, légumes et féculents, par rapport au quintile le plus fortement émetteur de GES (**Figure 14**) (Seconda *et al.* 2018a).

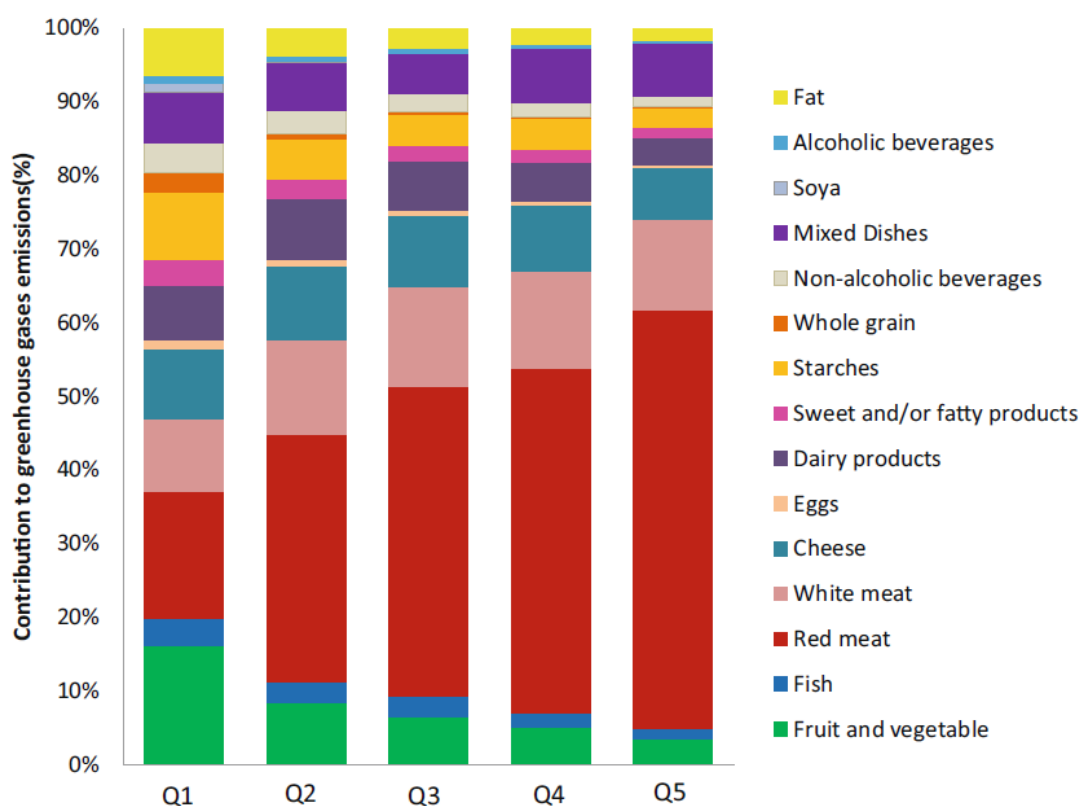


Figure 14. Contribution des groupes alimentaires aux émissions de GES des régimes individuels, par niveau d'émission de GES chez les adultes français de l'étude NutriNet-Santé 2014 ($n = 34\,193$).
(*extrait de Seconda et al. 2018*)

- **Des paramètres de durabilité pas toujours compatibles**

Payne *et al.* ont également effectué une revue de la littérature concernant les impacts de régimes à faibles émissions de GES sur la qualité nutritionnelle des régimes et les paramètres de santé. Ils ont conclu que les régimes à faibles émissions de GES n'étaient pas associés de façon cohérente à des effets positifs sur la santé, mais qu'il semblait y avoir une corrélation entre ces régimes et de plus faibles apports en sel et en AGS, mais également de faibles apports en certains micronutriments essentiels (Fe, Zn, Ca, Vitamine B12) et des apports en sucres élevés (Payne *et al.* 2016). Perignon *et al.* ont également conclu que les différents paramètres de durabilité n'étaient pas toujours compatibles. En effet, des régimes à haute qualité nutritionnelle étaient souvent associés à un coût économique élevé (Darmon et Drewnowski 2015). De même, une haute qualité nutritionnelle était parfois associée à des

impacts sur l'environnement supérieurs (Vieux *et al.* 2013). Les auteurs ont attribué cela à l'association inverse entre qualité nutritionnelle et densité énergétique. D'après eux, cela s'expliquait car les aliments émettant de faibles niveaux de GES et assez denses énergétiquement, comme les aliments riches en sucre et les féculents, étaient associés à une mauvaise qualité nutritionnelle. Aleksandrowicz *et al.* ont également conclu, dans leur revue de littérature, que les impacts sur la santé et l'environnement ne convergeaient pas toujours. Par exemple, la consommation de sucre avait des impacts en terme d'émissions de GES/kcal faibles et celle de certains fruits et légumes avait des impacts de GES/kcal supérieurs à certaines viandes de non-ruminants ou certains produits laitiers (Aleksandrowicz *et al.* 2016). De même, Ritchie *et al.* ont évalué les émissions de GES associées aux repères de consommation pour une alimentation équilibrée publiés par différentes organisations ou pays (OMS, USA, Australie, Canada, Allemagne et Inde). Les émissions de GES dépendaient largement des pays considérés (entre 687 kg eqCO₂/an en Inde et 1 579 kg eqCO₂/an aux Etats-Unis) et si la population mondiale adoptait les repères de consommation des Etats-Unis ou de l'Australie, cela augmenterait les émissions de GES par rapport à l'existant (Ritchie *et al.* 2018).

- **Régimes durables dans des sous-populations**

Les régimes de sous-échantillons de populations peuvent être considérés comme durables, c'est-à-dire nutritionnellement adéquats, diversifiés, avec des impacts environnementaux faibles et à faible coût. Au-delà des régimes végétariens précédemment discutés, mais difficilement généralisables dans une population entière, des études ont pu identifier des sous-populations omnivores, mais ayant des régimes plus durables que le reste de la population (Perignon *et al.* 2017).

Une étude récente sur un large échantillon français (NutriNet-santé, 2014, $n = 34\,193$) a montré que les régimes ayant les plus faibles émissions de GES étaient aussi ceux ayant le plus faible coût, la meilleure qualité nutritionnelle et les plus faibles valeurs de consommation énergétique et d'occupation des terres (Seconda *et al.* 2018a). De même, dans l'étude étatsunienne NHANES (2005-2010, $n = 16\,800$), les régimes liés aux plus faibles émissions de GES (exprimées en kg eqCO₂/1000 kcal) étaient de meilleure qualité (calculée avec le Healthy Eating Index, HEI) que les régimes liés aux plus fortes émissions. Comparés aux régimes fortement émetteurs de GES, les régimes faiblement émetteurs de GES étaient composés de moins de viande, produits laitiers, graisses et plus de poulet, protéines végétales, huiles, céréales complètes et raffinées et sucres ajoutés. Les régimes fortement émetteurs de GES apportaient cependant plus de vitamines A et D, choline, calcium, fer et potassium (Rose *et al.* 2019).

Masset *et al.* ont identifié, dans la population de l'étude INCA2, trois types des régimes : à faibles émissions de GES, à haute qualité nutritionnelle et plus durables. Les régimes les plus durables (au-dessus de la médiane pour les émissions de GES et la qualité nutritionnelle) avaient une adéquation nutritionnelle supérieure et des émissions de GES, un coût et une densité énergétique inférieurs à la moyenne de la population. Ces régimes étaient composés de moins de viande rouge et transformée, moins de fromage et plus de fruits et légumes que la moyenne de la population. La part de protéines végétales dans ce régime était 20% supérieure à la moyenne de la population pour les hommes et 15% pour les femmes (Masset *et al.* 2014). Biesbroek *et al.* ont identifié, dans la cohorte EPIC-NL (1993-1997, $n = 36\,203$), deux profils de consommateurs. Le profil le plus végétalisé (forte consommation de fruits, légumes, légumineuses et faible consommation de viande rouge et transformée) était associé à une meilleure qualité de l'alimentation et à une moindre émission de GES que l'autre régime (Biesbroek *et al.* 2018). Récemment, Seconda *et al.* ont identifié dans la cohorte NutriNet-Santé différents profils de durabilité à partir de huit indicateurs : la demande énergétique, les émissions de GES, l'occupation des terres, le pourcentage d'aliments biologiques, la densité, les sous-scores d'adéquation et de modération du PANDiet et la part du budget consacrée à l'alimentation (Seconda *et al.* 2018b). Les auteurs ont identifié six profils de consommateurs, dont un (23,6% de la population) présentait le meilleur profil concernant l'ensemble des indicateurs. Le régime de ce profil était caractérisé par 58% de consommation de viande rouge, 37% de viande blanche, 25% de fromage en moins par rapport la moyenne de la population et 15% de fruits et légumes en plus. Ce régime n'était cependant pas celui qui avait les valeurs maximales pour tous les paramètres étudiés. En effet, le régime ayant la meilleure adéquation nutritionnelle était celui qui avait le coût le plus élevé.

3.2. La modélisation de régimes améliorant ou optimisant la durabilité

De nombreuses modélisations ont été réalisées en lien avec la durabilité des régimes. Doro et Réquillart ont publié une revue de la littérature en 2018 sur les études de ce type (Doro et Réquillart 2018). Nous avons repris leur classification : les études consistaient soit à évaluer la durabilité de régimes théoriques ou de modifications de consommation, soit à utiliser l'optimisation linéaire pour identifier la composition de régimes durables, soit à évaluer l'impact de politiques économiques sur les émissions de GES et la santé.

- **Régimes théoriques ou scénarios théoriques d'évolutions de consommation**

Aleksandrowicz *et al.* ont réalisé une revue de la littérature sur les impacts de modifications de consommation alimentaire (vers des régimes particuliers ou théoriques) sur les différents paramètres de durabilité (Aleksandrowicz *et al.* 2016). Ils ont identifié que la transition d'un régime occidental à des régimes alternatifs contenant moins de viande (par exemple le régime végétarien, le remplacement de la viande par des aliments végétaux ou encore le respect des repères de consommation, etc.) conduirait à une réduction des impacts environnementaux (pour 197 des 210 scénarios évalués). En moyenne, les scénarios alternatifs permettaient de réduire de 22% les émissions de GES liés à l'alimentation, de 28% l'occupation des terres et de 18% l'utilisation en eau. Les auteurs ont identifié que les bénéfices les plus importants étaient observés pour des régimes qui réduisaient le plus la consommation d'aliments animaux, comme le régime végétalien (-55% et -45% d'impact sur l'utilisation des terres et les émissions de GES, respectivement), végétarien ou pesco-végétarien (**Figure 15**). Les scénarios de substitution partielle de viande rouge par des produits laitiers avaient le moins de bénéfices sur les impacts environnementaux. Doro et Réquillart ont identifié que, selon les études qui évaluent les effets de l'adoption de recommandations nutritionnelles (surtout limiter la viande rouge), cette adoption amènerait à une réduction des émissions de GES de 8% à 26% (en moyenne 13%). De même, des études ont évalué les effets de scénarios de modifications déterminées *a priori* (et arbitrairement), liées à la substitution de produits animaux par des alternatives. Ces scénarios amenaient le plus souvent à une réduction des émissions de GES (de -1% à -19%), sauf dans le cas d'une consommation de viande maximale de 50g/j et d'une non-consommation de charcuterie, où les calories de viande et charcuterie sont compensées par une augmentation de la consommation de fruits et légumes (+3% d'émissions de GES) (Vieux *et al.* 2012).

De nombreuses études (parfois les mêmes) ont également évalué l'effet de scénarios de transitions alimentaires sur des paramètres de santé. Aleksandrowicz *et al.* ont identifié sept études évaluant l'effet sur la mortalité ou la santé des scénarios précédemment décrits. Toutes les études ont montré un effet positif des scénarios, allant d'une réduction de moins d'1% de

la mortalité à 19% pour un régime végétalien. Doro et Réquillart ont identifié quatre études évaluant des effets sur la santé. Les études citées montrent, par exemple, que remplacer en partie la viande et les produits laitiers par des céréales (et/ou des fruits et légumes) amènerait à éviter des morts prématurées (environ 37 000/an au Royaume-Uni).

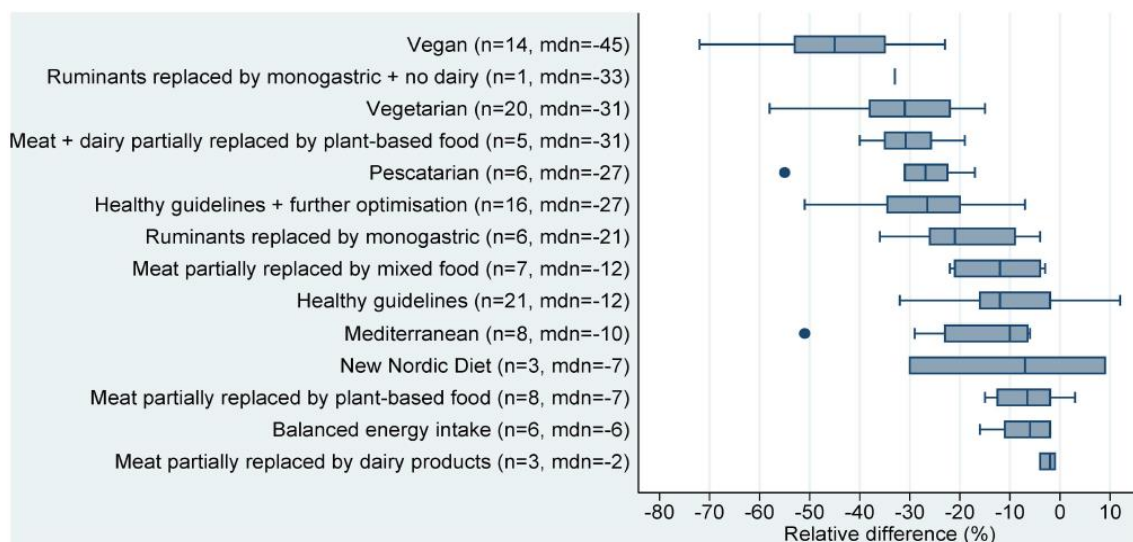


Figure 15. Différences relatives d'émissions de GES (kg eqCO₂/hab/an) entre les régimes moyens actuels et les régimes durables. n = nombre d'études, mdn = médiane
(*extrait de Aleksandrowicz et al, 2016*)

- **Régimes durables identifiés par optimisation linéaire**

En France, Perignon *et al.* ont modélisé des régimes nutritionnellement adéquats, s'éloignant le moins possible des régimes observés, pour différents niveaux de réduction des émissions de GES liées à l'alimentation (Perignon *et al.* 2016). La réduction progressive d'émissions de GES s'accompagnait, pour les femmes et dans un premier temps, d'une augmentation de la consommation de fruits, légumes, pommes de terre, céréales, lait, plats composés à base légumes et poisson et d'une diminution de la consommation de fromage, plats composés à base de viande, charcuterie et viande rouge (**Figure 16**). Les auteurs ont conclu qu'une réduction de 30% des émissions de GES était possible pour un régime adéquat nutritionnellement sans s'éloigner trop des régimes observés. Barré *et al.* ont modélisé, à partir de régimes observés, et pour chaque sexe, des régimes nutritionnellement adéquats, amenant à une réduction d'au moins 30% des émissions de GES, de l'eutrophisation et de l'acidification, en prenant en compte la biodisponibilité du fer, du zinc et des protéines, ainsi que le lien entre production de produits laitiers et production de viande. Les régimes optimisés étaient composés à 50% de protéines animales (contre 67% dans les régimes observés), avec une diminution de 62% de la viande pour les hommes et 32% pour les femmes, dont une diminution de 38% de la viande rouge chez les hommes et 27% chez les femmes (Barré *et al.* 2018).

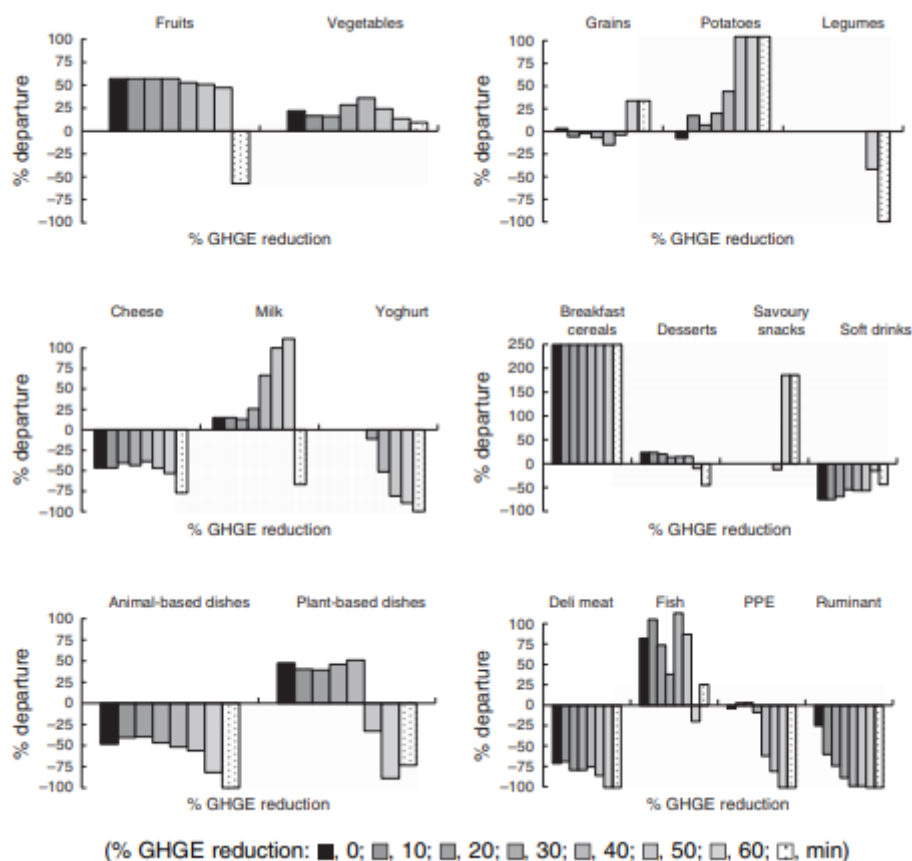


Figure 16. Variation (%) de quantité consommée des sous-groupes pour des régimes nutritionnellement adéquats pour différents niveaux de réduction des émissions de GES pour les femmes françaises de l'enquête INCA2.

(extrait de Perignon et al. 2016)

Ces conclusions ont été généralisées par Gazan *et al.*, qui ont effectué une revue des études utilisant l'optimisation linéaire pour identifier des régimes durables. Ils ont identifié que les études qui ne prenaient pas ou peu en compte l'acceptabilité culturelle des modifications pour identifier les régimes nutritionnellement adéquats les plus durables pouvaient aboutir à de fortes réductions des émissions de GES (entre 70% et 90%) en réduisant fortement la consommation de viande rouge et de produits animaux en général et en augmentant la consommation de fruits et légumes, légumineuses et céréales (Gazan *et al.* 2018). C'était aussi le cas en prenant en compte des contraintes d'acceptabilité, mais dans une moindre mesure. En prenant en compte l'ensemble des paramètres de durabilité étudiés et en garantissant des régimes adéquats nutritionnellement, des modifications acceptables culturellement et économiquement, les auteurs ont estimé qu'une réduction des impacts environnementaux des régimes de l'ordre de 30% était possible. Van Dooren a abouti à la même conclusion dans sa revue de littérature (van Dooren 2018). Doro et Réquillart ont conclu de la même manière et ont émis quelques conclusions supplémentaires sur les études

concernant l'optimisation linéaire. Ces études ont montré que le lien entre adéquation nutritionnelle et émissions de GES dépendait des pays considérés et du sexe considéré. En effet, Vieux *et al.* ont évalué récemment si le respect des contraintes nutritionnelles amenait à une réduction des émissions de GES des régimes associés, en minimisant l'écart aux diètes observées dans 5 pays européens pour les hommes et les femmes. Ils ont montré que dans 7 cas sur 10, les émissions de GES augmentaient pour des régimes nutritionnellement adéquats, et que dans 3 cas sur 10 elles diminuaient (Vieux *et al.* 2018). Les auteurs ont également souligné le fait que des substitutions au sein des groupes alimentaires (*a priori* plus acceptables que des substitutions entre les groupes) étaient rendues possibles par l'optimisation linéaire, ce qui n'était pas toujours le cas avec d'autres méthodes.

Une étude de Willett *et al.*, issue du travail de 37 scientifiques issus de 16 pays, experts dans des domaines différents, de la santé publique à l'agriculture, en passant par les sciences politiques et la durabilité environnementale, a été publiée en 2019, dans le but de décrire des régimes alimentaires durables (Willett *et al.* 2019). L'optimisation linéaire n'a pas été utilisée dans cette étude. Les auteurs ont étudié la littérature scientifique et défini des objectifs scientifiques mondiaux en matière de régimes alimentaires sains et de production alimentaire durable. Ils ont intégré ces objectifs dans « *un cadre commun lequel définit un « espace hors danger » pour les systèmes alimentaires, afin qu'un régime santé planétaire (à la fois sain et respectueux de l'environnement) puisse être identifié* ». Ce régime consistait à plus que doubler la consommation de fruits, légumes, légumineuses et noix et à réduire de plus de 50% la consommation de sucres ajoutés et viande rouge (**Tableau 4**). Les auteurs ont cependant nuancé en expliquant que « *le rôle des aliments de source animale dans l'alimentation doit être soigneusement examiné dans chaque contexte et dans le cadre des réalités locales et régionales* ». Ils ont estimé que la mise en place d'un tel régime d'ici 2050 permettrait d'éviter environ 11 millions de morts prématurées à l'échelle mondiale, ainsi que de limiter les impacts de l'alimentation sur le changement climatique et le cycle de l'eau. En revanche, il serait nécessaire de coupler ces changements de régimes alimentaires à une réduction des pertes alimentaires et à de meilleures pratiques de production agricole pour respecter les objectifs en termes de changement d'usage des sols, cycles d'azote, de phosphore et de perte de biodiversité.

Tableau 4. Cibles scientifiques pour un régime alimentaire planétaire, avec des gammes possibles, pour un apport de 2500 kcal par jour.

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

(extrait de Willet et al. 2019)

- **Impact de politiques économiques sur les émissions de GES et la santé**

Doro et Réquillart ont identifié huit études évaluant l'impact de politiques publiques sur la qualité de l'alimentation, la santé et les émissions de GES (Doro et Réquillart 2018). La majorité des études concernait l'hypothèse de la mise en place de taxes basées sur les émissions de GES associées aux produits alimentaires et ne prenaient pas en compte la qualité nutritionnelle des produits. Ces études considéraient les régimes alimentaires entiers et prenaient en compte les substitutions entre les groupes alimentaires (et pas au sein des groupes alimentaires). Deux types d'hypothèses étaient mises en place : une simple taxation

des produits en fonction de leur empreinte carbone, ou en plus de cela, une redistribution des recettes de la taxe pour réduire le prix des aliments à faibles émissions de GES. Dans le cas d'une taxe simple sur les produits en fonction des émissions de GES (32 €/t CO₂), la consommation de bœuf diminuait de 5 à 20%, du fait de l'augmentation des prix. La consommation de volaille diminuait peu (voire augmentait), du fait d'une moindre augmentation de prix et d'une substitution du bœuf pour la volaille. Au niveau nutritionnel, l'apport énergétique diminuait d'entre 1,5 et 3%, les apports en AGS diminuaient et les apports en sucres augmentaient. Les impacts sur la santé n'étaient pas cohérents en fonction des études : selon une étude, la qualité de l'alimentation pouvait diminuer, mais selon une autre étude cela pouvait éviter des morts prématurées. Globalement, ces taxes amèneraient à une réduction des émissions de GES entre 5 et 12%, en diminuant le coût pour les consommateurs (de 45 à 50€/an). Dans le cas où les recettes des taxes étaient utilisées pour diminuer le prix des produits faiblement émetteurs de GES, la consommation de bœuf diminuait le plus et la consommation de fruits et des produits denses en énergie augmentait. Au niveau nutritionnel, l'apport énergétique augmentait de 1 à 3%, l'apport en AGS diminuait légèrement et l'apport en sucres augmentait. Cela indiquerait des effets négatifs sur la santé. Les émissions de GES étaient réduites de 4,5 à 6%, avec un coût neutre pour le consommateur.

En France, Irz *et al.* ont évalué l'effet de recommandations diététiques ou nutritionnelles marginales ($\pm 5\%$) sur la mortalité prématurée évitée (avec le modèle DIETRON) et sur les impacts environnementaux. Ainsi, augmenter la consommation de fruits et légumes de 5% permettrait d'éviter 2 507 morts prématurées/an et réduire sa consommation de viande rouge 245 morts prématurées/an, sachant que le modèle comportemental avait estimé que l'augmentation de 5% des fruits et légumes induisait une baisse de viande rouge de 9%. Les émissions de GES liées à ces modifications seraient diminuées de 1 574 kt eqCO₂ pour une augmentation de 5% de fruits et légumes et de 274 kt eqCO₂ pour une diminution de 5% de viande rouge (Irz *et al.* 2016). En convertissant les impacts sur la santé et les impacts environnementaux en bénéfices (en €), les études de ce type ont montré que le bénéfice sur le climat était faible comparé à celui sur la santé (le ratio impact climat/impact santé était entre 0,01 et 0,21 en fonction des études). En comparaison aux autres types de modèles (définis *a priori* ou par optimisation linéaire), cette analyse de politiques économiques était donc moins optimiste car elle amenait à des réductions d'émissions de GES de l'ordre de 10%. De plus, les modèles de taxes en fonction des émissions de GES qui diminuaient le prix des produits à faibles émissions de GES étaient susceptibles d'être délétères pour la qualité nutritionnelle des régimes. Une solution serait la redistribution des recettes de la taxe vers des produits à bonne qualité nutritionnelle (fruits et légumes).

3.3. L'acceptabilité dans la modélisation de régimes durables

La majorité des dernières revues de la littérature a souligné l'importance de la prise en compte de l'acceptabilité culturelle dans les modèles de modifications diététiques. En effet, les études n'imposant pas de contrainte d'acceptabilité (ou uniquement par l'intermédiaire du prix) identifiaient des régimes essentiellement constitués de quelques aliments à haute qualité nutritionnelle, en grande quantité, ce qui ne semblait pas applicable. Comme développé par Gazan *et al.*, l'acceptabilité culturelle a été prise en compte dans les optimisations de régimes durables en minimisant l'écart entre les régimes moyens observés et les régimes optimisés et en imposant des limites maximales ou minimales de quantité consommée d'aliments, de groupes alimentaires ou de quantité/énergie totale (Gazan *et al.* 2018). Ces limites ont été définies à partir de la distribution des consommations d'aliments ou groupes alimentaires et parfois à partir d'avis d'experts. Une approche plus fine, prenant en compte la variabilité interindividuelle, consistait à optimiser le régime de chaque individu en s'éloignant le moins possible des régimes individuels observés. D'après les auteurs, minimiser les écarts aux régimes observés pouvait se faire de deux manières : minimiser l'écart quadratique par rapport à la consommation observée, ce qui favorisait de faibles variations de chaque aliment ou minimiser la déviation en tant que pourcentage du régime observé, ce qui favorisait des variations plus élevées de quelques groupes alimentaires. Une modélisation récente prenait en compte la variabilité interindividuelle des régimes en considérant, pour chaque individu, que modifier les quantités d'aliments déjà consommés était plus acceptable qu'introduire un nouvel aliment non-consommé ou supprimer la consommation d'un aliment (Horgan *et al.* 2016). Dans cette étude, la quantité de viande consommée augmentait pour quelques individus pour réduire leurs émissions de GES de 30%, tout en ayant des régimes nutritionnellement adéquats. Gazan *et al.* ont donc conclu que l'« acceptabilité » était difficile à évaluer, car il n'y a pas de fonction permettant de mesurer objectivement l'acceptabilité et si une modification envisagée est « faible » ou « importante ».

Dans sa revue de la littérature, van Dooren a également souligné la nécessité d'introduire des contraintes d'acceptabilité dans les modèles d'optimisation linéaire et a identifié, d'une part, que les hypothèses émises n'avaient jamais été testées et d'autre part qu'aucune étude n'avait trouvé la « solution ultime » pour calculer l'acceptabilité de modifications. Il a décrit certaines méthodes innovantes dans la littérature (van Dooren 2018). Maillot *et al.* ont mis en place une fonction objectif qui avait pour but de modifier préférentiellement les quantités consommées des aliments des répertoires individuels, de minimiser la diminution de la quantité de chaque aliment du répertoire et, si nécessaire, introduire des aliments non-consommés, en sélectionnant préférentiellement les plus consommés dans la population française (Maillot *et al.* 2009). Van Dooren *et al.* ont développé une fonction objective qui minimisait le nombre de

portions modifiées et introduisait préférentiellement les aliments les plus consommés (van Dooren *et al.* 2015). Par exemple, en moyenne, dans les régimes des hommes, 50 aliments sur 83 n'étaient pas modifiés (en nombre de portions calculées) et 55 sur 73 pour les femmes. Le modèle modifiait les portions de huit aliments pour les hommes (sept pour les femmes) et introduisait neuf nouveaux aliments pour les hommes (huit pour les femmes). Tyszler *et al.*, quant à eux, ont développé un score de pénalité, qui reflétait la popularité de chaque aliment (estimée par la quantité consommée dans l'enquête nationale de consommation des Pays-Bas), pour prendre en compte l'acceptabilité culturelle. Dans leurs modèles, la taille des portions modifiées pour chaque aliment était multipliée par la quantité consommée (normalisée) de cet aliment dans l'enquête nationale de consommation. Ainsi, les aliments fréquemment consommés dans la population étaient favorisés pour l'augmentation des portions et défavorisés pour la diminution des portions (Tyszler *et al.* 2016). Doro et Réquillart ont décrit les mêmes méthodes et ont souligné des approches d'autres études pour minimiser l'écart aux régimes observés. Par exemple, Green *et al.* ont développé une méthode inspirée des théories économiques. Dans ce cas, la distance aux régimes observés était calculée en tant que la somme pondérée des écarts relatifs (entre diète observée et modélisée) au carré pour chaque aliment. La pondération était le rapport de la part des dépenses d'un produit divisée par sa propre élasticité-prix¹. Le modèle cherchait donc à trouver la combinaison d'aliments qui minimisait les écarts (pondérés) des pourcentages de consommation au carré aux niveaux souhaités. En conséquence, ils ont estimé que de 0 à 30% de réduction d'émission de GES, des régimes nutritionnellement adéquats pouvaient être modélisés sans beaucoup augmenter les écarts aux diètes observées (**Figure 17**) (Green *et al.* 2015).

¹ L'élasticité-prix est le rapport entre la variation relative de la demande d'un bien et la variation relative du prix de ce bien. Ce rapport est généralement négatif car lorsque le prix augmente, la quantité demandée diminue et réciproquement.

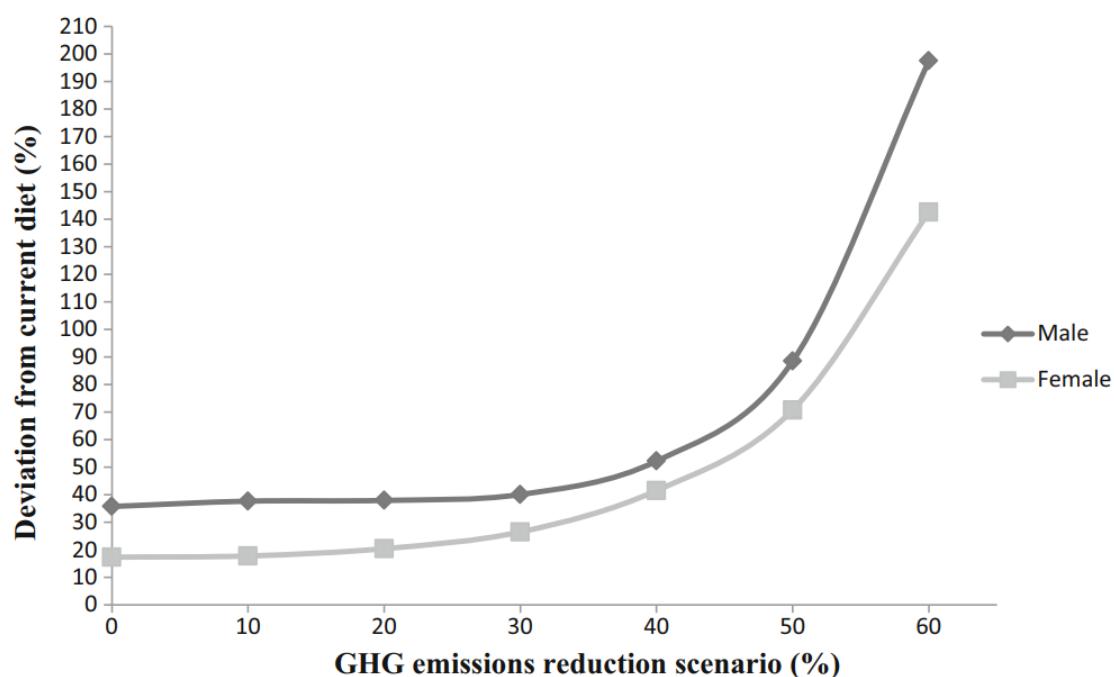


Figure 17. Ecart des régimes optimisés aux régimes observés, avec les émissions de GES correspondantes.

(extrait de Green et al. 2015)

Doro et Réquillart, ont tout de même conclu que les modifications des régimes amenant à des régimes adéquats et réduisant les émissions de GES étaient « significatives ». En effet, la consommation de certains groupes alimentaires s'éloignait des consommations observées de plus de 50%. Par exemple, les modifications de Vieux et al. étaient de l'ordre de 1,5 à 2 kg d'aliments par jour, sur 2 à 3kg de régime total (Vieux et al. 2018). Ces modifications, même si elles minimisaient l'écart à la diète observée, avaient beaucoup de contraintes, et la diète finale s'éloignait beaucoup de la diète initiale. Les modèles économiques de Irz et al. ont pris en compte la perte de « bien-être » due au fait que la recommandation impliquerait de consommer des aliments moins appréciés ou plus compliqués à préparer. Le modèle a utilisé les relations de substitutions entre catégories d'aliments estimées par l'observation des achats alimentaires. Cependant ces modèles amenaient à des réductions marginales des émissions de GES et à des régimes non adéquats nutritionnellement.

Une autre approche pour simuler des modifications acceptables, qui n'est pas évoquée dans les revues de la littérature précédentes, consistait en des modifications « pas-à-pas » des régimes observés. Verger et al. ont simulé, dans l'étude INCA2, une série de 20 étapes de modifications unitaires des régimes individuels observés. A chacune des étapes, ils ont identifié, dans chaque régime individuel, la substitution d'un aliment par un autre qui augmentait le plus l'adéquation nutritionnelle, selon trois scénarios. Dans un premier scénario supposé acceptable, les aliments étaient remplacés par leur version allégée. Dans un

deuxième scénario, moins acceptable, les aliments consommés étaient substitués par des aliments du même sous-groupe alimentaire. Enfin, dans un dernier scénario, supposé peu acceptable, les aliments consommés étaient substitués par des aliments du même groupe alimentaire (Verger *et al.* 2014). Cette méthode a été reprise par Bianchi *et al.* selon des scénarios différents, sur une série de dix étapes. Dans le scénario le plus acceptable, la modification de taille de portion d'un aliment qui augmentait le plus l'adéquation nutritionnelle était sélectionnée. Les deux autres scénarios étaient des substitutions intra-groupes et inter-groupes, comme précédemment. Bianchi *et al.* ont également introduit des règles de substituabilité *a priori*, à partir d'avis d'experts, pour n'autoriser que des substitutions plausibles dans un contexte de consommation français (par exemple, la substitution de légumes par des yaourts n'était pas autorisée) (Bianchi *et al.* 2018a). Cette étude est la seule à avoir testé les hypothèses d'acceptabilité des modèles. En effet, Bianchi *et al.* ont réalisé une enquête en ligne sur un panel de femmes enceintes (2016, $n = 155$) et leur ont demandé leur intention (oui/non) de suivre les modifications de consommation les plus fréquentes issues des trois scénarios. Ils ont ainsi pu vérifier que le premier scénario était plus acceptable que le deuxième, qui était plus acceptable que le troisième. De plus, les auteurs ont identifié une relation inverse entre acceptabilité des modifications diététiques et leur efficacité pour augmenter l'adéquation nutritionnelle (**Figure 18**). Cependant, dans cette étude, les paramètres de durabilité n'étaient pas considérés et à de rares exceptions (remplacement d'un yaourt par un fruit à certains moments de consommation) les modifications proposées ne consistaient pas en une végétalisation du régime ou à une diminution de son impact environnemental.

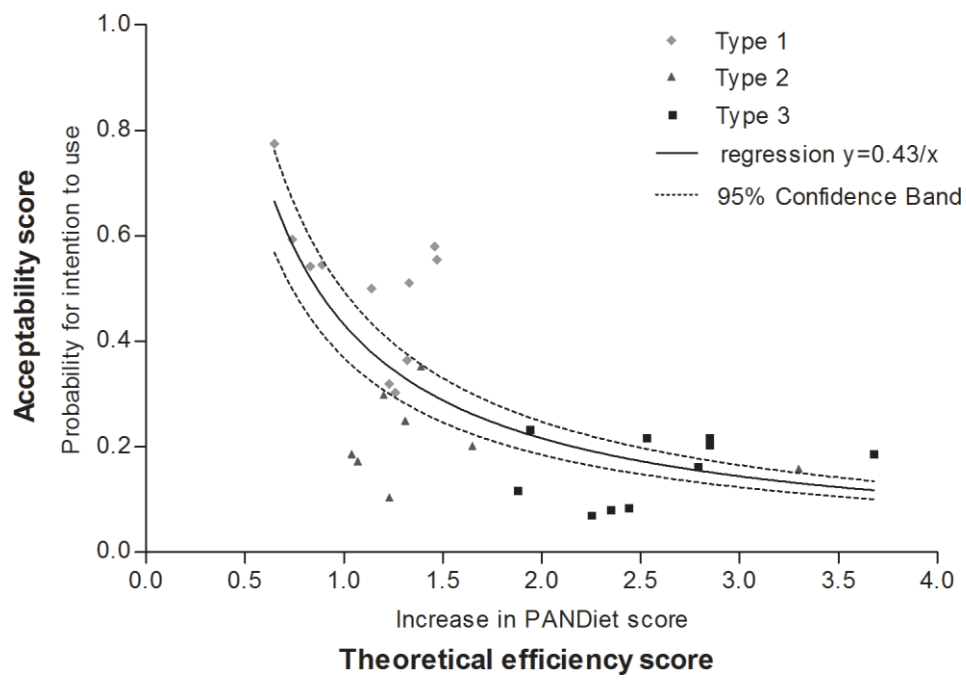


Figure 18. Acceptabilité des modifications de consommation selon leur efficacité théorique.
(d'après Bianchi et al. 2018)

Conclusion partielle

La littérature concernant la durabilité des régimes alimentaires est riche, particulièrement dans les dernières années. Certaines études ont évalué la durabilité de régimes observés. Ces études, souvent hétérogènes car basées sur des méthodes différentes, consistaient le plus souvent à identifier les régimes associés aux émissions de GES les plus faibles. Ces régimes contiennent, dans la plupart des cas, moins de viande et plus de poisson, fruits et légumes et féculents (complets ou non) que les régimes moyens. Cependant, les émissions de GES ne définissent pas seuls la durabilité et les différents paramètres de durabilité ne sont pas toujours compatibles. En effet, les régimes nutritionnellement adéquats sont souvent plus chers. Les régimes émettant le moins de GES ne sont pas toujours les meilleurs nutritionnellement (du fait des faibles émissions de GES des aliments à forte densité énergétique) et les régimes issus des repères de consommation nationaux ne sont pas toujours associés à des réductions des émissions de GES. Il est cependant possible d'identifier des sous-populations aux régimes plus durables. La modélisation de scénarios simulant le remplacement de la viande par des protéines végétales amènent à de moindres émissions de GES de l'ordre de 20%, une moindre occupation des terres et un nombre de morts évitées significatif. L'optimisation linéaire permet d'identifier des régimes durables. Sans contrainte d'acceptabilité, les émissions de GES de ces régimes peuvent diminuer jusqu'à -70 à -90%. En introduisant des contraintes d'acceptabilité, on estime que des réductions d'émissions de GES de l'ordre de 30% sont possibles avec 50% de protéines végétales dans les régimes. L'acceptabilité, lorsqu'elle est prise en compte, consiste, dans la plupart des cas, à minimiser l'écart entre les régimes simulés et les régimes observés. Quelques études ont développé des approches novatrices visant à considérer que la modification de tailles de portions est plus acceptable que l'introduction de nouveaux aliments ou la suppression d'un aliment consommé et que l'introduction d'aliments fortement consommés dans la population est plus acceptable que celle d'aliments faiblement consommés. Enfin, des approches consistant à identifier les trajectoires de modifications qui améliorent le plus la qualité de l'alimentation à partir d'algorithmes pas-à-pas ont été développées, pour prendre en compte l'acceptabilité le plus finement possible, mais elles ne considèrent pas d'autres critères de durabilité.

Conclusion générale

Dans les pays occidentaux, les protéines animales (principalement la viande) contribuent à deux tiers des apports protéiques et les protéines végétales (principalement les céréales) à un tiers. Les régimes basés sur l'exclusion de sources de protéines animales se développent, mais leur prévalence reste faible ($\leq 2\%$ de végétariens en France). Les régimes intermédiaires consistant à simplement réduire sa consommation de viande se sont développés rapidement ces dernières années, du fait de facteurs socio-économiques et de la prise de conscience des impacts des niveaux de consommation de protéines animales actuels sur la santé, l'environnement et le bien-être animal. Cependant, des freins sont encore présents pour envisager une diminution conséquente de la consommation de viande : les habitudes et le plaisir liés à la consommation de viande, les normes sociales et la dissonance cognitive amenant au déni des informations sur les impacts négatifs de la viande. Les leviers identifiés concernent le développement de nouvelles normes sociales, de produits végétaux savoureux (en magasin ou restauration collective), de compétences de cuisine et la modification de tailles de portions usuelles. Les aliments sources de protéines animales contiennent plus de protéines (de meilleure qualité), fer, zinc, vitamine B12, calcium ou $\omega 3$ à longue chaîne, mais plus d'AGS et sel et moins de folates et fibres que les aliments sources de protéines végétales. La consommation de protéines végétales est positivement associée à une meilleure adéquation nutritionnelle et à un moindre risque de maladies chroniques (cardiovasculaires, cancers et diabète de type 2). La viande de ruminants est liée à des émissions de GES, des surfaces cultivées, des impacts sur l'eutrophisation et l'acidification et des énergies non-renouvelables utilisées plus importantes que les autres sources de protéines animales, qui ont des impacts plus importants que les sources de protéines végétales. Dans les régimes observés, les différents paramètres de durabilité ne sont pas toujours compatibles. Des régimes durables ont cependant été observés dans des sous-échantillons ou ont pu être modélisés. Ils consistent, dans la majorité des cas, à une réduction de la consommation de viande, surtout transformée et rouge et une augmentation de la consommation de fruits, légumes, féculents complets ou non, et poisson gras. L'optimisation linéaire permet d'identifier des régimes nutritionnellement adéquats avec de meilleurs paramètres de durabilité (des émissions de GES réduites d'environ 30%) et qui s'éloignent le moins possible des régimes observés. La prise en compte de l'acceptabilité culturelle des modifications simulées est insuffisante et nécessite des approfondissements.

Chapitre 2 - Travaux de thèse

1. Justification des travaux

L'introduction bibliographique nous a permis de faire un état des lieux de la littérature sur la problématique des régimes durables dans les pays occidentaux. On a pu voir que, malgré une littérature riche sur les questions de qualité des protéines animales et végétales et sur les différences de biodisponibilité du fer et du zinc dans les sources de protéines, très peu d'études prenaient en compte ces paramètres pour estimer les prévalences d'inadéquation dans les populations. De plus, les nutriments et les aliments ne peuvent être considérés séparément les uns des autres car ils forment un système complexe avec des éléments en interaction. Identifier des profils de consommation au sein des populations permet de prendre en compte cette complexité. Il semblerait que la consommation des aliments sources de protéines permette d'identifier des profils de consommateurs associés à des événements de santé. Or, peu d'études ont identifié des profils de consommation dans la population française et aucune étude n'a identifié de profils de consommation de sources de protéines. Les motivations, freins et leviers à modifier les régimes alimentaires pour aller vers des régimes plus durables ont été largement étudiés, mais principalement dans les pays scandinaves, en Belgique ou au Royaume-Uni. Or, ces pays ont, historiquement, une proportion de végétariens élevée et des attitudes positives vis-à-vis du végétarisme, contrairement à la France. On connaît donc peu les motivations et les freins des français à faire évoluer leur comportement alimentaire vers des régimes plus durables. L'analyse de la littérature nous a également permis d'identifier que l'acceptabilité culturelle des régimes durables modélisés n'était prise en compte que très partiellement. En effet, la majorité des études associe l'acceptabilité culturelle à une minimisation de l'écart aux régimes observés et aboutissent tout de même, à cause de contraintes sur des paramètres de durabilité, à des régimes modélisés s'éloignant beaucoup des régimes observés. De plus, les hypothèses d'acceptabilité mises en place dans les régimes n'ont pas été testées. Enfin, on a pu voir que la végétalisation des régimes occidentaux était *a priori* durable, mais qu'elle pouvait amener à des déséquilibres nutritionnels. Peu d'études ont cherché à évaluer ces éventuels déséquilibres au regard des autres paramètres de durabilité observés. L'objectif de cette thèse était de modéliser des trajectoires acceptables de modification de consommation de sources de protéines pour augmenter l'adéquation nutritionnelle, en lien avec les paramètres de durabilité. Pour cela, le premier volet de la thèse consistait à réaliser un état des lieux des profils de consommation protéique en France, en lien avec l'adéquation nutritionnelle et les motivations à faire évoluer l'alimentation. Le deuxième volet concernait la modélisation prospective de restructuration des apports protéiques individuels pour augmenter l'adéquation nutritionnelle, selon différents scénarios d'acceptabilité et la validation des hypothèses envisagées. Enfin, la dernière partie avait pour objectif d'évaluer l'impact sur différents paramètres de durabilité de ces modifications.

1.1. Etat des lieux des profils de consommation de sources de protéines et adéquation nutritionnelle en France

- **Adaptation d'un indice de qualité nutritionnelle adapté à la problématique des protéines animales et végétales**

Les études évoquées dans l'introduction bibliographique évaluent l'adéquation nutritionnelle des régimes observés ou modélisés, soit à partir des apports individuels de chaque nutriment, soit à partir d'indices de qualité de l'alimentation. Le Mean Adequacy Ratio (MAR) et le Mean Excess Ratio (MER) sont des indices fréquemment utilisés pour évaluer l'adéquation nutritionnelle. Le MAR est une moyenne des rapports, pour chaque nutriment pour lequel une référence nationale de population (RNP) a été définie, de l'apport nutritionnel par la RNP pour ces nutriments (Perignon *et al.* 2016; Vieux *et al.* 2013). Le MER est une moyenne des rapports, pour chaque nutriment à limiter, des apports nutritionnels par les limites maximales définies. Cependant, ces indices ne prennent pas en compte la variabilité intra-individuelle des apports, ni la variabilité interindividuelle des besoins ou des distributions non normales des besoins. En revanche, l'indice PANDiet, développé et validé par Verger *et al.* pour évaluer la qualité nutritionnelle des régimes permet de prendre en compte ces paramètres (Verger *et al.* 2012). Cet indice évalue la probabilité que le régime d'un individu soit nutritionnellement adéquat en utilisant deux sous-scores semblables au MAR et au MER : le sous-score d'Adéquation (AS), qui combine les probabilités d'avoir des apports nutritionnels suffisants pour les nutriments ayant des valeurs de référence et le sous-score de Modération (MS), qui évalue la probabilité de ne pas avoir des apports excessifs en nutriments. Les valeurs nutritionnelles étaient majoritairement les BNM de référence en France (ou des pseudo-BNM calculés à partir de l'apport satisfaisant ou d'une borne de l'intervalle de référence comme s'il s'agissait d'une RNP). Les probabilités d'adéquation de chaque nutriment pour chaque individu sont calculées à partir de la formule suivante :

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

F : fonction *probnorm* de SAS, qui donne la probabilité qu'une observation d'une distribution normale standard soit inférieure ou égale à l'argument de la fonction

$\bar{y}$: apport moyen de l'individu pour le nutriment donné

r : recommandation nutritionnelle utilisée pour ce nutriment (le plus souvent le BNM)

SD_r^2 : variabilité interindividuelle de la recommandation nutritionnelle de ce nutriment

SD_y^2 : variabilité intra-individuelle de l'apport de ce nutriment

n : nombre de jours dans le recueil de consommation individuel

Bianchi *et al.* ont mis à jour le PANDiet pour prendre en compte de nouvelles références nutritionnelles et l'ont adapté à l'évaluation de l'adéquation nutritionnelle des régimes des femmes enceintes. Pour cela, ils ont ajouté des nutriments qui n'étaient pas pris en compte à l'origine dans le PANDiet : l'acide α -linoléique (ALA), l'acide linoléique (LA), la somme des EPA+DHA, le DHA, l'iode, le sélénium et la vitamine B5 (Bianchi *et al.* 2016).

En 2016, l'Anses a réalisé une revue de la littérature pour mettre à jour l'ensemble des références nutritionnelles (Anses 2016a). Dans ce cadre, il a été nécessaire de mettre à jour les paramètres du PANDiet pour prendre en compte ces nouvelles références. De plus, comme développé dans l'introduction bibliographique, les sources de protéines animales et végétales n'ont pas la même biodisponibilité en ce qui concerne les apports en protéines, fer et zinc. Il a donc été nécessaire d'utiliser les formules précédemment évoquées pour évaluer les apports en protéines, fer et zinc « absorbés » et les comparer aux besoins nutritionnels physiologiques (donc « absorbés »). Enfin, l'ensemble des agences sanitaires a choisi de ne pas reconduire de valeur nutritionnelle de référence concernant le cholestérol. Nous avons donc décidé de supprimer le cholestérol du calcul du MS. La prise en compte des différences de profils en acides aminés et digestibilité des protéines a été développée dans le **travail personnel n°1**. La mise à jour du PANDiet pour prendre en compte les nouvelles références nutritionnelles est présentée dans le **travail personnel n°2**.

- **Adéquation en protéines et acides aminés selon la consommation de protéines végétales en France**

L'introduction bibliographique nous a permis d'identifier que, lorsque la prévalence d'inadéquation des apports en protéines était calculée, les valeurs de références utilisées étaient souvent des pourcentages de l'énergie totale, qui ne prennent pas en compte la variabilité interindividuelle due au poids corporel, au contraire de la valeur de référence de 0,66 g/kg p.c./j (Allès *et al.* 2017). De même, les évaluations ne considéraient pas toutes l'apport usuel en protéines (Perignon *et al.* 2018) et la qualité des protéines animales et végétales n'était pas prise en compte lors de l'évaluation de la prévalence d'inadéquation des apports en protéines (à part par Perignon *et al.*). Pour pouvoir prendre en compte la qualité des protéines, il a fallu obtenir la composition en acides aminés des différents aliments étudiés. Ces données n'étant pas disponibles dans la base de données du CIQUAL en France, une base de donnée de composition en acides aminés a été développée à partir des données françaises réalisées sur la viande (Centre d'Information des Viandes 2005; Centre d'Information des Viandes & INRA 2009) et des données analytiques de bases de données des agences sanitaires des Etats-Unis, du Canada, du Japon et de Nouvelle-Zélande.

De plus, la digestibilité des protéines étant différente entre sources de protéines animales et végétales, il a fallu prendre en compte cette différence dans l'estimation de la prévalence d'inadéquation. Comme la méta-analyse de Rand *et al.* a été réalisée à partir de protéines « de bonne qualité » (Rand *et al.* 2003), nous avons considéré que le BNM déterminé correspondait à la digestibilité des protéines animales. Les protéines végétales étant en moyenne 5% moins digestibles que les protéines animales (en compilant les études de digestibilité iléale chez l'Homme), nous avons décidé d'appliquer une pénalité de 5% aux apports protéiques provenant de sources végétales.

Les résultats des estimations de prévalences d'inadéquation en protéines et en acides aminés en France, selon la part des protéines végétales dans les régimes, sont présentés dans le **travail personnel n°1**.

- **Identification de profils de consommateurs protéiques en France et adéquation nutritionnelle**

Comme évoqué dans l'introduction bibliographique, les régimes liés à la consommation de sources de protéines ont été largement étudiés dans les dernières années. Cependant, les études se limitent le plus souvent à la comparaison de populations omnivores avec des populations végétariennes ou flexitariennes sur des critères de qualité nutritionnelle de l'alimentation ou de morbidité et/ou mortalité (Clarys *et al.* 2014; Dinu *et al.* 2017; Mullee *et al.* 2017). La population « omnivore » est, dans ce cas, considérée comme homogène et les différents profils de consommateurs au sein de cette population ne sont que peu étudiés. Nous avons vu que les approches basées sur les ACP/AF et CAH permettaient d'identifier des profils de consommation au sein des populations générales. Gazan *et al.* ont montré que l'utilisation de NMF pour identifier des facteurs (« systèmes de consommation ») était particulièrement adaptée, au contraire de l'ACP ou l'AF (Gazan *et al.* 2016). En se basant sur les données de consommation de l'étude INCA2, ils ont identifié sept profils de consommateurs, y compris un profil « soucieux de sa santé » et un profil « snacker », correspondant aux profils « prudent » et « occidental » retrouvés dans la majorité des études. Le profil « soucieux de sa santé » était caractérisé par une meilleure adéquation nutritionnelle (estimée par le MAR) que le profil « snacker ». Cependant, cette approche ne permettait pas d'analyser les apports protéiques et d'identifier des groupes d'aliments protéiques consommés ensemble et donc des profils de consommateurs protéiques. Deux études évoquées dans l'introduction avaient identifié des profils de consommateurs protéiques en lien avec des événements de santé aux Etats-Unis (Mangano *et al.* 2015; Mangano *et al.* 2017), mais n'avaient pas évalué l'adéquation nutritionnelle de ces profils.

Le **travail personnel n°2** présente donc l'identification de profils de consommateurs protéiques par NMF et l'évaluation de l'adéquation nutritionnelle de ces profils, en utilisant le PANDiet, une approche probabiliste, individuelle, qui prend en compte les dernières références nutritionnelles et les différences de biodisponibilité en fer et en zinc et de digestibilité des protéines animales et végétales.

- **Lien entre profils de consommation protéiques, attitudes et croyances vis-à-vis des différentes sources de protéines et consommation de sources de protéines en France**

Après avoir évalué l'adéquation des apports protéiques et l'adéquation nutritionnelle globale des différents profils de consommateurs protéiques, il a semblé pertinent de s'intéresser aux motivations des français à modifier leur consommation de sources de protéines, en lien avec leurs attitudes et croyances vis-à-vis des aliments sources de protéines. En effet, comme démontré dans l'introduction bibliographique, la diminution de la consommation de produits carnés dans les pays occidentaux ces dernières années s'est accompagnée d'une faible augmentation du pourcentage de végétariens, mais d'un développement important de profils intermédiaires basés sur une consommation modérée de produits carnés (la part de la population déclarant limiter de sa consommation de viande a augmenté de 23% à 35% entre 2015 et 2018 en France) (Tavoularis et Sauvage 2018).

Différentes motivations sont associées à la diminution de la consommation de viande. Dans les pays nordiques, en Belgique, aux Pays-Bas ou au Royaume-Uni, de nombreuses études ont identifié la santé comme la motivation principale à réduire sa consommation de produits carnés. Chez les plus jeunes et chez les individus ayant la consommation de viande la plus élevée, l'environnement semble être une motivation à modifier son comportement alimentaire. Les végétariens sont plus sensibles au bien-être animal que les autres groupes de consommateurs. Cependant, ces études ont été menées le plus souvent sur des populations non représentatives, dans des pays ayant historiquement une proportion élevée de végétariens et des attitudes positives envers le végétarisme, contrairement à la France (Ruby *et al.* 2016).

Pour pouvoir évaluer les motivations des stades précoces de la transition vers une moindre consommation de protéines végétales, une enquête sur un échantillon représentatif de la population française a été réalisée en 2018. Les différents profils identifiés, leur consommation associée et les attitudes et croyances vis-à-vis des sources de protéines associées sont décrites dans le **travail personnel n°3**.

1.2. Trajectoires de réarrangements de la consommation de sources de protéines visant à améliorer l'adéquation nutritionnelle

- **Analyse prospective d'une substitution des protéines animales par des protéines végétales déjà consommées**

L'introduction bibliographique nous a permis de discuter de la qualité des protéines animales et végétales. Les sources de protéines végétales contenant moins de protéines que les sources animales, ayant des profils déséquilibrés en acides aminés pour certaines sources (déficience en lysine pour les céréales, en acides aminés soufrés pour certaines légumineuses) et une digestibilité légèrement plus faible, la question de l'adéquation des apports en protéines dans la population dans une perspective de transition nutritionnelle vers une moindre consommation de protéines animales se pose.

Même si un certain consensus s'est établi considérant que les apports protéiques peuvent être adéquats pour des populations végétariennes, si des mélanges entre céréales et légumineuses sont consommés (American Dietetic Association 2009), une étude a rapporté une prévalence d'inadéquation des apports protéiques de 9,8% chez les hommes végétariens et 6% chez les femmes végétariennes et de 16,5% chez les hommes végétaliens et 8,1% chez les femmes végétaliennes (Sobiecki et al. 2016). Ainsi, même s'il est possible d'avoir des apports protéiques adéquats en planifiant son alimentation, il semblerait que certaines sous-populations n'y parviennent pas.

Aucune étude n'a évalué à partir de quelle part des protéines végétales dans l'alimentation un risque d'apport inadéquat en protéines existait. Nous présentons en **travail personnel n°1** l'évaluation des prévalences d'inadéquation en protéines et en acides aminés, dans différents scénarios substituant graduellement les protéines animales consommées par un individu par les protéines végétales déjà consommées par l'individu (de façon isocalorique) ou par un mélange de légumineuses, noix et graines.

- **Modélisation de trajectoires de réarrangements de la consommation de sources de protéines en améliorant l'adéquation nutritionnelle selon différents scénarios d'acceptabilité**

Les modèles du travail personnel n°1 évaluaient uniquement l'adéquation des apports protéiques, en omettant les autres nutriments. De plus, les hypothèses mises en œuvre dans ces modèles sont caricaturales et ne reflètent pas des modifications acceptables sur une population.

L'introduction bibliographique nous a permis d'évaluer que l'optimisation linéaire sous contraintes d'adéquation nutritionnelle des régimes, même prenant en compte l'acceptabilité sociale, amenait souvent à des régimes optimisés éloignés des régimes observés (Doro et Réquillart 2018; van Dooren 2018). En effet, cette prise en compte consistait en différents types de contraintes : minimiser l'écart entre le régime optimisé et le régime observé (soit un régime moyen d'une population, soit des régimes individuels) (Perignon *et al.* 2016) et imposer un maximum dans les quantités consommées d'aliments, en fonction des quantités maximales consommées dans la population (Barré *et al.* 2018). Quelques études ont émis des hypothèses plus fines pour modéliser des modifications acceptables : privilégier les modifications de taille de portion, supposées plus acceptables et si nécessaire introduire des aliments non consommés, mais en privilégiant les aliments fréquemment consommés dans la population (Maillot *et al.* 2009). Les hypothèses développées semblent intuitives mais n'ont pas été validées. De plus, ces études permettent d'identifier des régimes cibles nutritionnellement adéquats et durables, mais ces régimes optimisés ne correspondent pas nécessairement à des portions identifiables par les consommateurs. Si ces études permettent d'identifier les régimes cibles, ils n'identifient pas les trajectoires ni la temporalité pour effectuer la transition des régimes observés vers les régimes optimisés.

Dans d'autres domaines de recherche, identifier des profils de consommateurs permet de prédire le comportement de non-consommateurs ou d'individus pour lesquels de l'information est manquante dans la base de données. En effet, le « filtrage collaboratif » utilisé dans les systèmes de recommandation se base sur l'hypothèse suivante : si un individu A partage les préférences d'un individu B sur une thématique, alors il y a des chances que l'individu B partage les préférences de l'individu A sur une autre thématique. Pessiot *et al.* ont recommandé l'utilisation de NMF pour identifier des profils d'individus similaires et prédire les préférences d'un individu à partir des préférences des autres individus du même profil (Pessiot *et al.* 2006). Ainsi, identifier des clusters d'individus ayant des régimes alimentaires similaires par NMF permettrait de prédire l'acceptabilité d'introduire un aliment non-consommé en fonction de la part de consommateurs de l'aliment dans le cluster.

Une autre approche a été utilisée pour simuler des évolutions de régimes alimentaires qui améliorent l'adéquation nutritionnelle, en identifiant les trajectoires, par étape, permettant d'aller vers des régimes optimisés. L'approche mise en place par Verger *et al.* consiste, comme évoqué précédemment, à simuler des substitutions d'aliments de recueils de consommation individuels. Pour cela, toutes les substitutions possibles d'aliments consommés par des aliments semblables mais allégés, du même sous-groupe, ou du même groupe alimentaire sont simulées, selon le scénario envisagé. Le PANDiet correspondant au régime

intégrant chaque substitution est calculé et la substitution qui augmente le plus le PANDiet est intégrée au régime individuel. Le processus est ainsi itéré 20 fois, pour limiter l'écart au régime observé et dégager les premiers « mouvements » dans la bonne direction, pouvant faire l'objet de conseils personnalisés ou généralisables (Verger *et al.* 2014). Bianchi *et al.* ont repris cette approche, en l'adaptant à l'élaboration de conseils pour des femmes enceintes. Ils ont affiné la méthode en introduisant un scénario concernant les modifications de tailles de portion, supposées plus acceptables que des substitutions. De plus, des contraintes ont été ajoutées pour limiter les substitutions envisagées à des substitutions acceptables dans un contexte alimentaire français (par exemple, un yaourt pouvait être remplacé par un fruit, mais pas par du pâté) (Bianchi *et al.* 2018a).

Des simulations reprenant ce type d'approches ont donc été mises en place pour identifier les trajectoires de réarrangement de la consommation de sources de protéines, selon différents scénarios aux niveaux d'acceptabilité différents. Etant donné les évolutions rapides de la consommation d'aliments protéiques observées dans la littérature, il a semblé pertinent, et *a priori* acceptable, de limiter les modifications diététiques aux seuls aliments sources de protéines. En effet, la transition diététique actuelle, en lien avec les attitudes et croyances sur les effets positifs ou négatifs de la consommation de protéines animales, semble s'effectuer majoritairement sur les aliments sources de protéines. Des scénarios similaires à l'approche de Verger *et al.* et Bianchi *et al.* ont été développés pour cela. Un premier scénario, supposé le plus acceptable, consistait à augmenter la taille de portion d'un aliment protéique, tout en diminuant la taille de portion d'un autre aliment protéique (S1). Le deuxième scénario, supposé moins acceptable, consistait à diminuer une taille de portion d'un aliment protéique et soit augmenter la portion d'un autre aliment, soit introduire une petite portion d'un aliment non-consommé, à condition que celui-ci soit consommé par plus de 10% des individus du profil de consommation protéique auquel l'individu appartient (S2). La modification qui augmentait le plus le PANDiet était ainsi sélectionnée et le processus était itéré 20 fois (**Figure 19**). Les méthodes employées et résultats obtenus sont détaillés dans **le travail personnel n°4**.

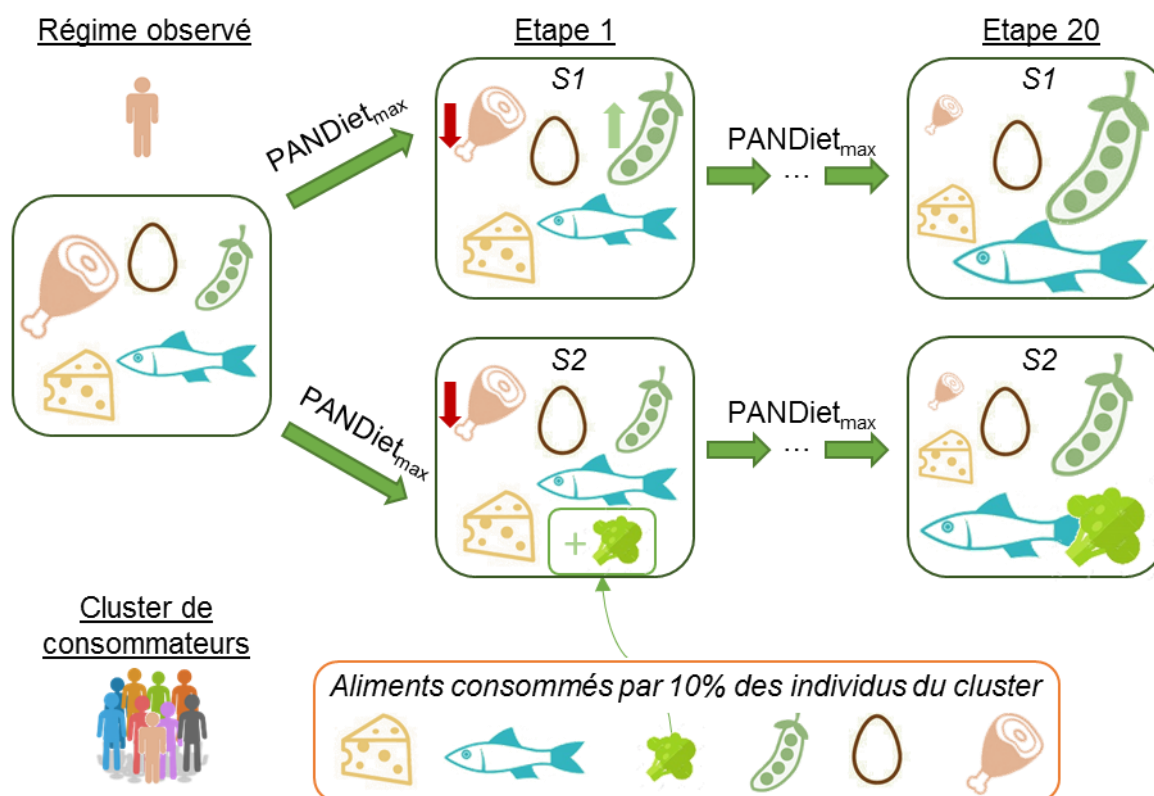


Figure 19. Simulations d'amélioration "pas-à-pas" de l'adéquation nutritionnelle

- **Enquête sur les hypothèses des modèles, validations et améliorations**

Les différentes revues de la littérature sur la modélisation de régimes durables ont conclu que la prise en compte de l'acceptabilité dans ces modèles était limitée et que les hypothèses mises en place pour introduire les contrainte d'acceptabilité n'étaient presque jamais testées (Gazan *et al.* 2018). Bianchi *et al.* ont testé l'acceptabilité de modifications simulées pour augmenter l'adéquation nutritionnelle pendant la grossesse sur un panel de femmes enceintes. Ils ont pu conclure que les modifications de tailles de portions étaient plus acceptables que les substitutions au sein de sous-groupes alimentaires, qui étaient plus acceptables que les substitutions au sein de groupes alimentaires (Bianchi *et al.* 2018a). Cela rejoint les résultats de Poquet *et al.*, qui ont identifié, à partir d'entretiens semi-directifs chez des mères françaises, que les modifications de tailles de portions étaient plus acceptables que les substitutions d'aliments carnés par des aliments végétalisés (Poquet *et al.* 2017). De même, Vanhonacker *et al.* ont classé l'acceptabilité des différentes alternatives amenant à des régimes plus durables. Ils ont identifié que la modification de tailles de portions était la plus acceptable, devant la substitution de la viande de ruminants par des viandes plus durables et la substitution de la viande par des aliments végétaux (Vanhonacker *et al.* 2013).

Il semblerait donc que l'hypothèse selon laquelle modifier sa taille de portion est plus acceptable que substituer des aliments soit valable. Cependant, aucune étude n'a comparé directement l'acceptabilité de ces deux alternatives. De même, aucune étude n'a étudié les différences d'acceptabilité de modification de consommation de différentes sources de protéines, car elles sont basées sur l'étude de la « viande » en général, ou de « substituts végétaux à la viande ». Or, comme différents profils de consommateurs protéiques existent, on peut supposer que l'acceptabilité de modifier la taille de portion d'un aliment varie selon le profil ou que l'acceptabilité d'introduire un nouvel aliment dépend des autres aliments consommés par les individus. Pour tester cela, une enquête sur un échantillon représentatif de la population française a été réalisée en 2018. Les dix diminutions de tailles de portion les plus fréquemment sélectionnées dans le travail personnel n°4 ont été proposées, ainsi que les dix augmentations les plus fréquentes (ou si l'aliment n'était pas consommé, l'introduction d'une petite portion de cet aliment). Les méthodes et les résultats de cette étude sont décrits dans le **travail personnel n°5**.

1.3. Impacts des trajectoires modélisées sur les paramètres de durabilité

Le travail personnel n°4 simulait les trajectoires à adopter pour augmenter l'adéquation nutritionnelle des régimes en ne modifiant que la consommation d'aliments protéiques. Cependant, cette méthode ignore les autres paramètres de durabilité évoqués dans l'introduction bibliographique. Les études d'observation ou d'optimisation convergent toutes pour conclure qu'un régime occidental durable s'obtiendrait par une diminution de la consommation de viande rouge et transformée, fromages et plats préparés tout en augmentant la consommation de fruits, légumes, céréales complètes et légumineuses (Gazan *et al.* 2018). Or, dans le travail personnel n°4, la part des protéines végétales dans les régimes augmente dans le premier scénario, mais diminue dans le deuxième. La question de l'impact des modifications simulées sur les autres paramètres de durabilité se pose donc.

- **Comparaison de scénarios visant systématiquement plus de protéines végétales ou non**

Etant donné la tendance de ces dernières années à une diminution de la consommation de viande (FranceAgriMer 2015) et à une augmentation du nombre de personnes déclarant limiter leur consommation de protéines animales et étant donné les différences de profils nutritionnels entre les différentes sources de protéines animales et végétales (Phillips *et al.* 2015), l'adéquation nutritionnelle des régimes visant plus de protéines végétales peut évoluer et des déficiences en certains nutriments peuvent apparaître. Une question différente de celles étudiées précédemment émerge donc au-delà de l'identification de trajectoires visant uniquement à améliorer l'adéquation nutritionnelle : si les individus ont la volonté de réduire leur consommation de produits carnés, ce qui semble être la tendance ces dernières années, quelles sont les trajectoires améliorant le plus l'adéquation nutritionnelle qui vont dans le sens de cette transition diététique ? Et quels sont les nutriments qui peuvent être « bloquants » lorsqu'on vise des régimes plus végétalisés ? Il a donc semblé pertinent d'identifier les trajectoires de réarrangement de la consommation de sources de protéines qui améliorent l'adéquation nutritionnelle tout en visant systématiquement à augmenter la part de protéines végétales. Dans le **travail personnel n°6**, le scénario 2 décrit dans le travail personnel n°4 est donc comparé à ce même scénario en ajoutant la contrainte d'augmenter le pourcentage de protéines végétales à chaque itération.

- **Impact sur les morts prématurées évitées et le risque lié à l'exposition aux contaminants**

Au-delà de l'aspect de la sécurité nutritionnelle, l'alimentation est aussi étudiée en tant que

facteur de risque ou facteur protecteur de maladies chroniques non-transmissibles, ainsi que vecteur d'exposition aux contaminants. Des modèles ont été développés pour évaluer la différence de mortalité prématurée induite par des scénarios de modifications du comportement alimentaire. Ces modèles utilisent les données issues de méta-analyses évaluant les risques relatifs liés à la consommation d'un aliment ou nutriment, vis-à-vis de la mortalité d'une ou plusieurs maladies chroniques. Le modèle PRIME (Preventable Risk Integrated ModEl) a été ainsi développé pour lier les facteurs de risque comportementaux à la mortalité par maladies chroniques non-transmissibles en lien (direct ou indirect) avec l'IMC, le cholestérol sanguin et la tension artérielle (Scarborough *et al.* 2014b). Le modèle inclut douze facteurs de risque dans le domaine de l'alimentation, l'activité physique et la consommation d'alcool et de tabac et 24 événements de santé (principalement MCV, cancers et diabète) (Figure 20).

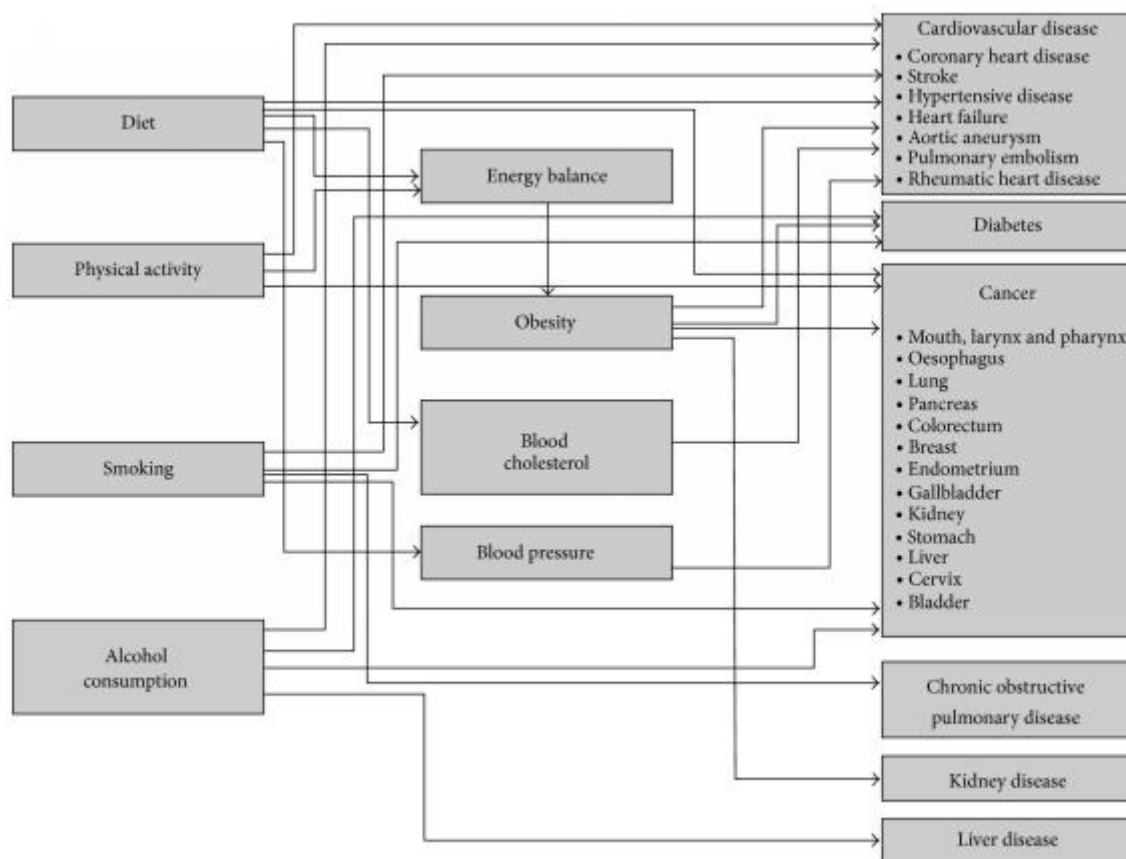


Figure 20. Diagramme schématisé du modèle PRIME
(extrait de Scarborough *et al.* 2014)

En utilisant ce modèle, Scarborough *et al.* ont estimé le nombre de morts prématurées évitées si la population du Royaume-Uni modifiait son comportement alimentaire vers des régimes durables. Une réduction de 50% de la consommation de viande et de produits laitiers,

compensée par des fruits, légumes et céréales amènerait ainsi à éviter 36 910 [30 192 ;43 592] morts prématurées, principalement par une réduction du risque de MCV (Scarborough *et al.* 2012). L'ensemble des nutriments ayant le même poids dans le calcul des sous-scores du PANDiet et les différents nutriments n'ayant pas les mêmes impacts sur les maladies chroniques, il a semblé complémentaire à l'évaluation de l'adéquation nutritionnelle d'évaluer les morts prématurées évitées par les régimes simulés.

De même, comme développé dans l'introduction bibliographique, les aliments sources de protéines animales et végétales ne sont pas vecteurs des mêmes contaminants chimiques et microbiologiques. Ainsi, une modification des comportements alimentaires pourrait être associée à de nouveaux risques liés à l'exposition aux contaminants. La comparaison des différents scénarios visant ou non une part plus élevée de protéines végétales en termes de mortalité prématurée évitée et d'exposition aux contaminants est également développée dans le **travail personnel n°6**.

- **Impacts sur les émissions de GES et le prix**

Parmi les autres paramètres de durabilité évoqués dans l'introduction bibliographique, les émissions de GES et le prix de régimes ont été étudiés plus en détails. Hartikainen et Pulkkinen ont développé une base de données compilant les études ayant réalisé des ACV en Europe avec des méthodes similaires et ont pris en compte les émissions de GES liées à la transformation, au stockage, à l'emballage et au transport, ainsi que la part consommée des produits servis pour évaluer les émissions de GES de 151 groupes alimentaires (Hartikainen et Pulkkinen 2016). Le panel français Kantar WorldPanel permet d'obtenir, tous les ans, la dépense et les quantités d'aliments achetées par 12 000 ménages français représentatifs. Les prix moyens des aliments peuvent donc être calculés en divisant les dépenses par les quantités de produits achetés (Kantar WorldPanel 2006). Au moment de la réalisation des modèles, les bases de données concernant les autres impacts sur l'environnement de denrées alimentaires n'étaient pas directement appariables aux données de consommation. Ainsi, seules les émissions de GES et le prix ont été évalués dans cette thèse. La comparaison de modifications qui améliorent l'adéquation nutritionnelle en visant systématiquement plus de protéines végétales ou non, en termes d'émissions de GES et de prix, est également présentée dans le **travail personnel n°6**.

- **Impact sur les filières de production**

Enfin, nous avons conduit un développement méthodologique pour évaluer les effets des scénarios envisagés précédemment sur les filières de production agricoles et notamment les quantités de produits agricoles consommées, la quantité d'aliments pour bétail nécessaire à

cette consommation et la surface nécessaire à la production d'aliments pour bétail. Cette méthode se base sur l'étude de cinq filières agricoles : la filière bovine (lait ou viande), porcine, poulets de chair, blé (dur ou tendre) et lentilles. Ces filières couvraient 74% des modifications simulées par les modèles précédents. Les données de la FAO ou d'Agreste sur la disponibilité alimentaire, la production de denrées agricoles ou les rendements ont été utilisées pour convertir les évolutions de consommation en évolutions de quantité de denrées, d'aliments végétaux et de surface agricole (Agreste 2018; FAO 2018). Les méthodes et résultats de ce travail sont présentés en français dans le **travail personnel n°6bis**, qui est un complément au travail personnel n°6, mais n'est pas destiné à être publié en tant que tel.

2. Travaux personnels

Les travaux personnels effectués pendant cette thèse seront présentés dans cette partie. Les **travaux personnels n°1 à 3**, qui ont été publiés, seront présentés dans le format dans lequel ils ont été publiés, précédés d'un résumé en français. Les **travaux personnels n°4 à 6** seront présentés dans le format dans lequel ils ont été soumis, précédés d'un résumé en français. Enfin, le **travail personnel n°6bis**, qui n'est pas destiné à être publié, sera présenté en français, sous la forme d'un article scientifique.

2.1. Travail personnel n°1 : L'adéquation des apports en protéines est avant tout une question de quantité de protéines et non de qualité : modélisation d'une augmentation du rapport protéines végétales/ protéines animales chez les adultes français

Résumé

Contexte : Une tendance à la baisse de l'apport en protéines animales (PA) a été observée dans les pays occidentaux au cours de la dernière décennie et les effets d'une telle transition sur l'adéquation des apports protéiques sont incertains.

Objectifs : Evaluer l'adéquation des apports en protéines et acides aminés indispensables des français et simuler les impacts d'une transition vers plus de protéines végétales sur cette adéquation.

Méthode : En utilisant une approche probabiliste et des modèles diététiques, à partir de données sur 1 678 adultes provenant d'une enquête nationale représentative de l'alimentation en France, nous avons étudié la sensibilité de l'adéquation des apports en protéines et en acides aminés aux changements de quantités de protéines animales et végétales. Nous avons simulé la substitution progressive de PA par différents mélanges de protéines végétales (PV), contenant diverses proportions de PV déjà consommées et de légumineuses, noix et graines (LNG).

Résultats : Nous avons constaté que les apports en protéines et en acides aminés répondaient aux besoins alimentaires de la quasi-totalité de la population étudiée. Les apports en protéines ($R^2=0,03$) et lysine ($R^2=0,18$) étaient associés au pourcentage de protéines végétales dans les régimes ($P < 0,0001$). Jusqu'à 50 % de PV dans l'alimentation, l'apport en protéines et en acides aminés était adéquat dans tous les scénarios. A partir de 50%, l'insuffisance de l'apport protéique était d'abord due à une trop faible quantité de protéines et à partir de 70%, à la qualité des protéines (principalement la déficience en lysine). L'introduction de LNG dans le mélange en remplacement des PA a permis des apports adéquats en protéines pour des pourcentages plus élevés de PV.

Conclusion : Une augmentation de PV basée sur le profil actuel des sources de protéines végétales, faibles en protéines et en énergie, pourrait conduire à un apport insuffisant en protéines, mais la contribution du LNG assure la sécurité d'une transition ultérieure.

Valorisation : Ce travail a été publié dans la revue *Nutrients* (Volume 9, n°12) le 8 décembre 2017.

Messages-clés

- Les apports en protéines et acides aminés sont adéquats dans la population française.
- Les apports en lysine sont associés au pourcentage de protéines végétales ($P < 0,0001$, $R^2=0,18$).
- Jusqu'à 50% de protéines végétales dans les régimes, une substitution des protéines animales par des protéines végétales est possible en assurant des apports adéquats.
- Au-delà de 50%, les apports protéiques ne sont plus adéquats, et à partir de 70%, les apports en lysine ne sont plus adéquats si on substitue les protéines animales par les protéines végétales déjà consommées.
- Substituer les protéines animales par un mélange de légumineuses, noix et graines permet une adéquation des apports en protéines et acides aminés.



Article

Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults

Erwan de Gavelle ¹, Jean-François Huneau ¹, Clélia M. Bianchi ¹, Eric O. Verger ² and François Mariotti ^{1,*}

¹ UMR PNCA, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005 Paris, France; erwan.degavelle@agroparistech.fr (E.d.G.); jean-francois.huneau@agroparistech.fr (J.-F.H.); clelia.bianchi@agroparistech.fr (C.M.B.)

² NUTRIPASS, IRD, Université Montpellier, SupAgro, 34394 Montpellier, France; eric.verger@ird.fr

* Correspondence: francois.mariotti@agroparistech.fr

Received: 24 October 2017; Accepted: 3 December 2017; Published: 8 December 2017

Abstract: A downward trend in animal protein (AP) intake has been observed in western countries over the last decade and the effects of such a transition on protein adequacy remain debatable. Using the probability approach and diet modeling with data on 1678 adults from a representative French national dietary survey, we studied the sensitivity of the adequacy of protein and amino acid intakes to changes in animal:plant protein. We simulated the gradual substitution of AP with different mixtures of plant protein (PP), containing various proportions of PP already consumed and legumes, nuts and seeds (LNS). We found that protein and amino acid intakes met dietary requirements in virtually the entire population studied. Up to 50% of PP in diets, protein and amino acid intakes were adequate in all models. From 50%, protein inadequacy was primary due to protein quantity, and from 70%, to protein quality (as lysine inadequacy). The introduction of LNS in the mixture substituting AP led to adequate protein intakes for higher percentages of PP. An increase in PP based on the current pattern of plant protein sources, low in protein:energy, could lead to inadequate protein intake, but the contribution of LNS ensures the safety of a further transition.

Keywords: plant protein; animal protein; protein adequacy; amino acid adequacy; modeling study

1. Introduction

Dietary protein is indispensable to deliver the nitrogen and amino acids required to meet metabolic demands, and particularly the renewal of body proteins. The results of nitrogen balance studies were used to define a protein requirement to be met using “good quality” dietary protein [1,2]. Nine amino acids (AA) which cannot be synthesized de novo in the body, or at a sufficient rate, are classified as indispensable (IAA). Dietary requirements for IAA have been set from the results of tracer-based studies. Protein and IAA requirements are used conjointly to define the quality of a given dietary protein [1]. A “good quality” protein is therefore one with high digestibility (as is the case for most animal proteins) that is rich in all the individual IAA required, i.e., a protein that will supply sufficient IAA to cover requirements when consumed at a level that complies with the global protein requirement. In this respect, the differences between animal and plant sources of protein have been highlighted: Plant protein sources tend to contain less overall protein, and cereals have a lower lysine content as a percentage of total protein [3] and slightly poorer digestibility [4] than animal protein [5]. This has given rise to concerns that a higher or a predominant intake of plant protein might lead to inadequate intake of protein and IAA when compared to requirements.

In Europe and the USA, dietary protein mainly comes from animal sources (between 55% and 71%, depending on the country) and particularly from red meat (which contributes between 16% and

35% to animal protein intake). Cereals are the principal contributors to plant protein intake (between 40% and 70% of plant protein) [6–8]. However, in western countries, the intake of animal products, and particularly meat, has decreased since the early 2000s (for instance, the mean meat intake has decreased by ~10% from 1998 to 2015 in France) [9]. This trend can be explained by the economic crisis, changes to household structure [9] and concerns about human health, animal welfare and the environment [10]. Furthermore, national guidelines tend to advise an increase in plant protein intake (from legumes and nuts in particular) and limitations on some animal proteins (cured and processed meats, red meat) [11,12]. Current and future trends could therefore lead to an inversion of the plant:animal protein ratio.

The literature contains protein intake estimates in western countries and populations who consume various levels of plant protein [6,13–16]. However, only a few studies have assessed the adequacy of their usual protein intake (as compared to dietary protein requirements). These studies have shown no prevalence of an inadequate protein intake in France [14], almost no inadequacy among U.S. male adults and little inadequacy among U.S. females adults [13]. Using a modeling analysis, the U.S. Dietary Guidelines Advisory Committee reported that even people consuming high levels of plant-based protein would be able to meet their protein requirements [12]. Data on the dietary intake of IAA, and its adequacies, remain scarce. Amino acid intake was assessed in the USA in 1988–1994 [17] and intake and adequacies were assessed in Japan from 2002–2003 [18] and in France in 1999 (for lysine and methionine only) [19]. These assessments showed no prevalence of inadequate intake for any of the IAA. However, based on the current food intake, some studies have proposed that compliance with recommendations designed to reduce the consumption of animal-based products may cause problems in meeting the recommended intake of certain nutrients, including protein [7], and prospective modeling of a 100% increase in the dietary plant protein intake showed that this would lead to an inadequate protein intake in a significant proportion of the population [20].

The literature on protein and amino acid adequacy is limited and is based on studies performed several years ago. Based on the current trend towards modifying the plant:animal protein ratio, and the evolutions anticipated in the future, it is necessary to determine the extent to which intake of protein and amino acids (and notably lysine) are sufficient at present to meet requirements, to characterize their association with the plant:animal protein ratio and to study its sensitivity to probable ongoing and future changes in intake.

2. Materials and Methods

2.1. Population and Dietary Data

The data used in this study were derived from the 7-day food records of adults involved in the second individual and national study on food consumption survey (INCA2) which was performed from 2006–2007 [21]. Adults over 65 years old were excluded because the reference intake in this population was estimated as being higher than the rest of the adult population by the French Food Agency (1.0 g/kg b.w./day instead of 0.8 g/kg b.w./day) [2]. Under and over-reporters were also excluded, based on a comparison between the reported energy intake and the basal metabolic rate, as estimated using Henry equations [22], and a cut off-value as defined by Black et al. [23], with physical activity levels of 1.4, 1.6 and 1.8 for little active (sedentary), moderately active and active lifestyles [24]. To ensure the representativeness of the sample, the data were weighted for unequal sampling probabilities and for differential non-responses by region, agglomeration size, age, sex, occupation of the household head, size of the household and season. The final sample contained 1678 adults (717 men and 961 females).

2.2. Energy, Protein and Amino Acid Compositions of the Diet

The nutrient contents of INCA2 foods were extracted from the 2016 CIQUAL (*Centre d'Information sur la Qualité des Aliments*—Centre for Information on Food Quality) database. Crude protein data

(N $\times$ 6.25) were used for the protein content since protein requirements had been estimated from nitrogen balance studies [25].

As the amino acid contents of INCA2 foods were not available in the 2016 CIQUAL database, an amino acid database was compiled using published French analyses [26] and international databases [27–30]. The complete method is detailed in Method S1.

To take account of the poorer digestibility of plant protein, a 5% penalty was applied to the protein intake from plant protein food items before the protein and amino acid intakes and probability of inadequacy were calculated. This 5% difference was based on the set of real ileal protein digestibility studies in humans [4,31] by calculating the mean digestibility of the plant protein foods tested and that of animal protein foods, weighted by study sample sizes.

The percentages of animal and plant protein in each food item were obtained by assigning food items to both categories and breaking down the mixed food into ingredients from the recipes, as described in detail elsewhere [8].

2.3. Adequacy of Protein and Individual Amino Acid Intakes

Usual protein and amino acid intakes were determined using the Multiple Source Method [32,33]. The prevalence of the inadequacy of usual protein and amino acid intakes was estimated using the probability approach [34,35]. We took account of variability in the EAR (estimated average requirement) (CV = 12.5% for protein and amino acids) and used the CDF function of SAS 9.1 that computes the left cumulative distribution function of the normal distribution. The prevalence of inadequacy according to the probability approach produces the best estimate of the proportion of individuals in a population with intakes which do not meet their requirements [34,35].

The EAR values used in this study were those estimated by the FAO/WHO/UNU [36] (Table S1).

2.4. Simulations of Changes to the Plant:Animal Protein Ratio

We established four models for substitutions between animal and plant protein in the diet of each individual:

- Model P, a protein-adjusted model in which the animal protein was replaced with the same amount of plant protein using sources already consumed by each individual. The proportion of protein from each plant food within the total plant protein intake was kept constant, as was the proportion of protein from each animal food within the total animal protein intake. In this model, the total protein intake of each individual thus remained constant.
- Model A, an energy-adjusted model in which animal protein was replaced with the same amount of energy (without alcohol) intake from plant foods already consumed. The proportion of energy from each plant food within the total plant energy intake was kept constant, as was the proportion of protein from each animal food within the total animal protein intake. In this model, the total energy intake (without alcohol) of each individual thus remained constant (Figure 1a).
- Model B, an energy-adjusted model in which animal protein was replaced with the same amount of energy (without alcohol) from a mix of legumes, nuts and seeds. The mix was defined by the observed intake of legumes, nuts and seeds in the INCA2 study. For example, 1 g of beef steak protein (i.e., 3.6 g of beef steak) is replaced by 0.17 g of legumes protein (2.35 g of legumes) and 0.07 g of nuts and seeds protein (0.34 g of nuts and seeds) (Figure 1b).
- Additionally, intermediate models combining model A and model B were designed. In these models, animal protein was replaced with the same amount of energy (without alcohol) from both plant foods already consumed and the mix of legumes, nuts and seeds in various proportions. The proportions of the mix of legumes, nuts and seeds in the substituting combination were 0% (i.e., same as Model A), 20% (model C₂₀), 40% (model C₄₀), 60% (model C₆₀), 80% (model C₈₀) and 100% (i.e., same as Model B).

Based on these models, we simulated a continuous increase in the mean plant protein percentage in the population and assessed the corresponding adequacy of resulting protein and IAA intake.

Particular emphasis was placed on lysine in the results as this was found to be the limiting IAA (i.e., that with the highest prevalence of inadequacy) in the different models.

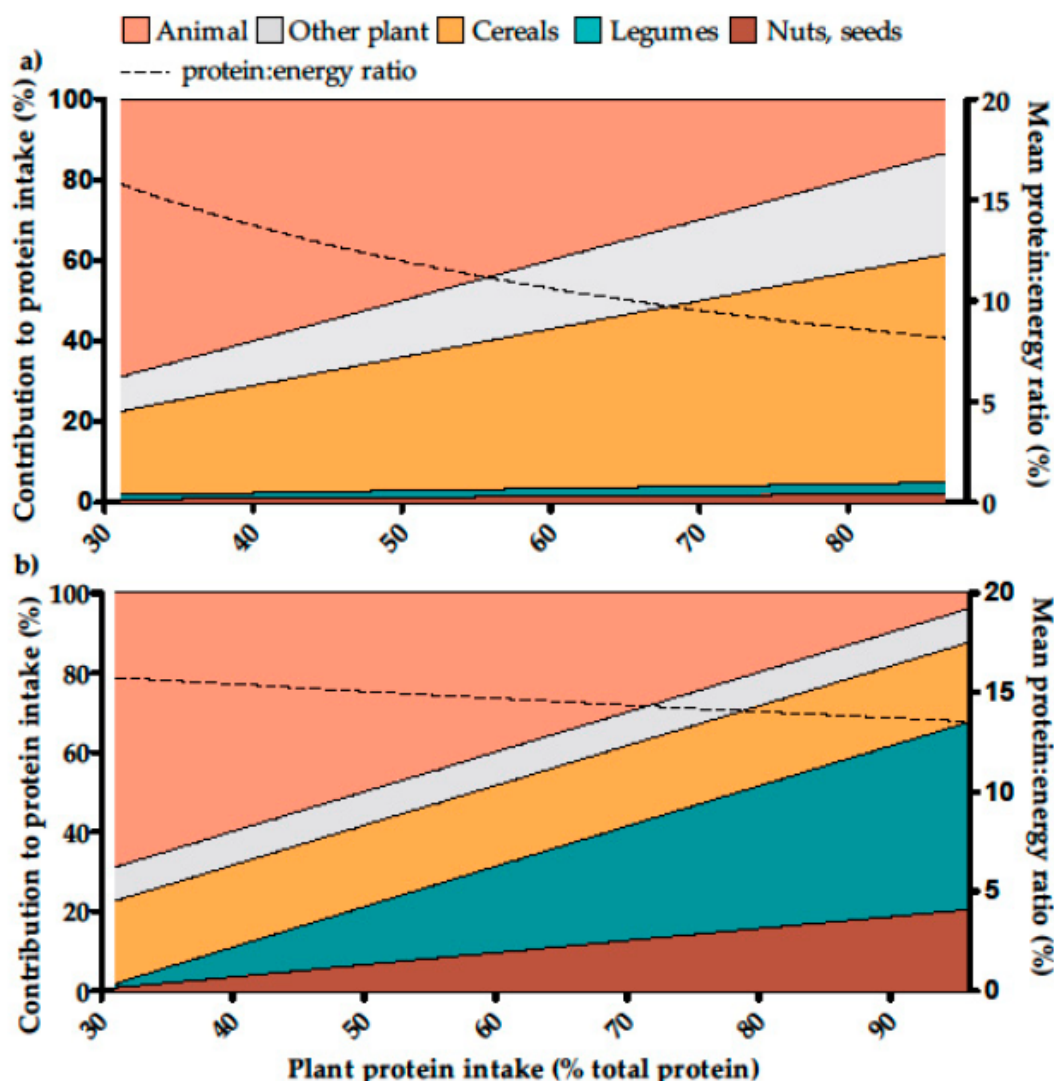


Figure 1. Contribution of animal protein and various plant sources (left axis) and protein:energy ratio (right axis) in the energy adjusted models of substitution of animal protein for plant foods in the French adult population (INCA2 study, $n = 1678$). (a) Animal protein was gradually substituted by the same amount of energy (without alcohol) from plant foods according to the current pattern of consumption in individuals (model A); (b) Animal protein was gradually substituted by the same amount of energy (without alcohol) from a mixture of legumes, nuts and seeds (model B). Intermediate models between A and B, i.e., models using 20%, 40%, 60% and 80% of a mixture of legumes, nuts and seeds in the combination used for the substitution are not shown. The highest plant protein level was not 100% due to the intake of mixed foods with both animal and plant protein sources.

2.5. Statistical Analyses

Data are presented as means $\pm$ SDs. A linear regression model was used to determine the association between protein and amino acid intakes and the plant protein intake (as a percentage of total intake). Then, adjustments were made for age, sex, body mass index (BMI) and energy intake

(without alcohol). Significance was set at $p < 0.05$. Statistical analyses were performed using SAS 9.1.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

3. Results

3.1. Protein and Amino Acid Intakes and Adequacy to Requirements

The mean protein intakes were $1.34 (\pm 0.34)$ and $1.25 (\pm 0.30)$ g/kg b.w./day ($91 (\pm 26)$ and $85 (\pm 23)$ mg/kg b.w./day for lysine and $32 (\pm 9)$ and $30 (\pm 8)$ mg/kg b.w./day for methionine) in French adult men and women, respectively. The mean protein and amino acid intakes stratified by sex, age and BMI are presented in Tables S3 and S4. The prevalence of inadequacy of the usual intake was estimated as being less than 0.05% for all individual amino acids (Figure 2) and 0.31% for protein.

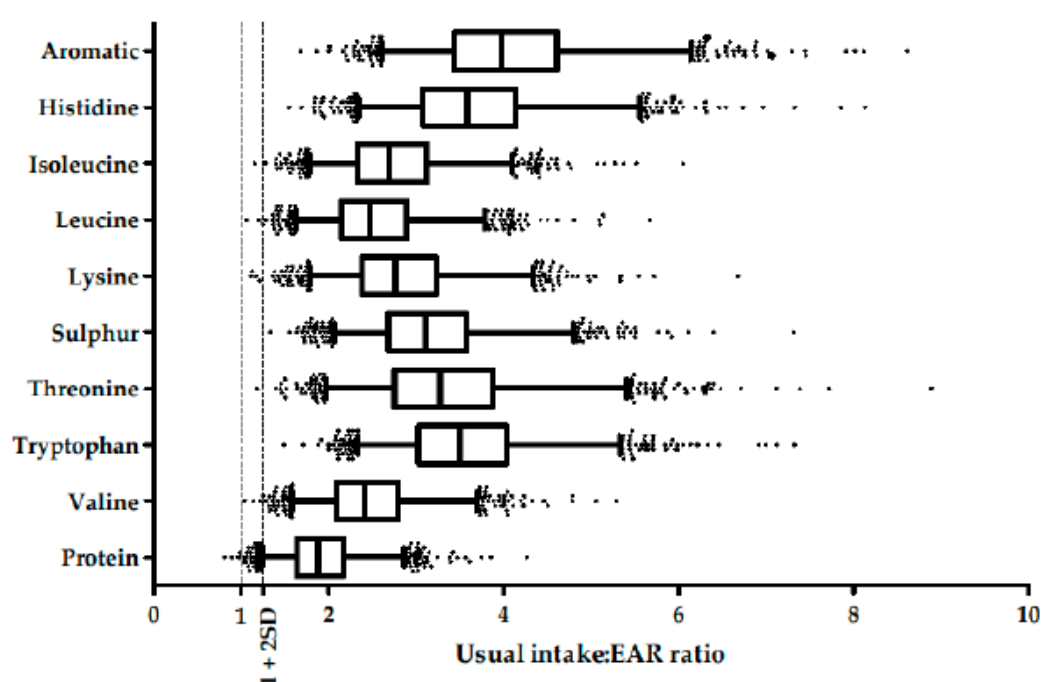


Figure 2. Usual intake:EAR ratio distribution of protein and amino acids in the French adult population (INCA2 study). Distribution of usual intakes of protein and IAA are represented using boxplots with median, 25th and 75th percentiles and whiskers drawn left to the 2.5th and right to the 97.5th percentiles. Points are individuals outside the 2.5th–97.5th percentile range. If the ratio between the usual intake and EAR of an individual was equal to 1, the probability of an adequate intake was 50% and if the ratio was $1 + 2SD$, the probability of an adequate intake was 97.5%. The prevalence of inadequacy in the population was lower than 0.05% for all IAA and 0.31% for protein. EAR, Estimated average requirement; INCA2, Individual and National Consumption Survey 2 ($n = 1678$).

3.2. Foods Contributing to Protein and Amino Acid Intakes

Animal and plant proteins contributed respectively 69% and 31% to the total protein intake, as previously reported [8] for both men and women. The main plant contributor of the total protein intake was cereals (21% in men, 20% in women), which accounted for 67% of the plant protein intake. The principal animal contributor of the total protein intake was meat (41% in men, 35% in women), which accounted for 59% of animal protein intake in men, and 51% in women. The lysine intake was mainly due to animal intake (84% in men, 82% in women), and particularly meat (51% in men, 43% in women). Cereals represented 9% of lysine intake in both men and women (Table 1).

Table 1. Food groups for animal and plant proteins contributing to protein and lysine intake in the French adult population (INCA2 study) ¹.

Food Contributing to Intake	% Protein Intake ²		% Lysine Intake ²	
	Men	Women	Men	Women
Animal	69.2 ± 8.4	68.5 ± 7.7	83.7 ± 5.9	82.5 ± 5.7
Meat	40.6 ± 13.6	34.7 ± 11.2	51 ± 15.3	43.5 ± 13.3
Red meat	19.4 ± 11.2	16.6 ± 9.2	23.7 ± 13.7	20.1 ± 11.2
Poultry	10.7 ± 10.4	9.3 ± 8	14.7 ± 13.7	12.8 ± 10.7
Game	0.4 ± 2.2	0.1 ± 1.1	0.5 ± 3	0.2 ± 1.5
Offal	0.8 ± 2.3	0.8 ± 2.2	0.9 ± 2.6	1 ± 2.5
Delicatessen	9.4 ± 6.1	7.8 ± 5.2	11.2 ± 7.6	9.4 ± 6.4
Fish	6.3 ± 6.6	8.2 ± 6.4	8.3 ± 8.6	10.7 ± 8.5
Dairy products	19 ± 9.1	21.4 ± 7.9	21.3 ± 10.9	24.3 ± 9.4
Milk	5.2 ± 5.7	6.6 ± 5.6	5.7 ± 6.7	7.2 ± 6.5
Yogurt	3.2 ± 4.1	4.9 ± 4.1	3.9 ± 4.9	5.9 ± 4.9
Cheese	10.2 ± 6.6	9.5 ± 5.7	11.4 ± 7.8	10.8 ± 6.8
Other dairy products	0.4 ± 0.3	0.5 ± 0.4	0.4 ± 0.3	0.4 ± 0.4
Eggs	3.3 ± 2.5	4.3 ± 2.7	3.1 ± 2.6	4 ± 2.9
Plant	30.8 ± 8.4	31.5 ± 7.7	16.3 ± 5.9	17.5 ± 5.7
Cereals	21.5 ± 7.4	20.2 ± 6.3	8.9 ± 4.3	8.6 ± 3.5
Potatoes	1.8 ± 1.2	1.9 ± 1.2	1.6 ± 1.1	1.8 ± 1.1
Fruit	1.6 ± 1.4	2.2 ± 1.9	1 ± 1.1	1.5 ± 1.5
Vegetables	2.4 ± 1.4	3.1 ± 1.5	2.3 ± 1.4	2.9 ± 1.4
Nuts and seeds	0.8 ± 1.5	0.8 ± 1.2	0.4 ± 0.7	0.4 ± 0.6
Legumes	1 ± 1.7	1.1 ± 1.9	1.1 ± 1.8	1.1 ± 2
Other plant products	1.2 ± 1	1.5 ± 1.1	0.6 ± 0.8	0.8 ± 0.9
Seasonings	0.5 ± 0.4	0.6 ± 0.7	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.6

¹ INCA2, Individual and National Consumption Survey 2; *n* = 1678 (717 men and 961 women); ² Mean ± Standard Deviation. The contributions of each food group to the intake of individual AA are shown Table S5.

3.3. Association between Protein and Lysine Adequacy and Dietary Plant Protein Intake

The intake:EAR ratios for protein and each IAA were negatively associated with the percentage of plant protein in the diets of French adults ($p < 0.0001$). However, the variability in intakes was poorly explained by the percentage of plant protein in the diets ($R^2 = 0.03$ for protein and $R^2 < 0.1$ for all IAA), except for lysine ($R^2 = 0.18$) (Figure 3). The slope of the linear regression was low for the protein intake (-0.06 g/kg b.w./day for 10% more plant protein, i.e., -9% of the EAR) and higher for the lysine intake (-0.01 g/kg b.w./day for 10% more plant protein, i.e., -35% of the EAR). Results were still significant and similar, although numerically stronger, after adjustments for age, sex, BMI and energy intake as potential confounders (from $\beta = -0.009$ and -0.035 before adjustments to $\beta = -0.018$ and -0.046 for protein and lysine after adjustments, respectively).

Only the data on proteins and lysine are shown because the probability of an inadequacy of all other amino acids was lower than the probability of an inadequacy of proteins in all the simulations.

According to the model adjusting for protein intake (Model P), simulations of a reduction in animal protein intake in favor of the same amount of plant protein led to an important increase in energy intake (~ 300 kcal per 10% increment in the percentage of plant protein). The simulation showed that the probability of a lysine inadequacy increased with the percentage of plant protein to reach 5% (3.96; 6.04) for a mean of 85% plant protein in the diets.

According to the model adjusting for energy intake (Model A), simulations of a reduction in animal protein intake in favor of the same of energy from plant protein sources led to an increase in the probability of protein inadequacy which reached 5% (95% CI: 3.96; 6.04) and 50% (47.61; 52.39) for mean plant protein contents of 50% and 85% in the diets, respectively. Lysine inadequacy also increased to reach 5% (3.96; 6.04) when the mean plant protein content of the diets reached 58%. Lysine

inadequacy became higher than protein inadequacy when plant protein accounted for >70% in the diets, to reach almost 80% (78.09; 81.91) with a mean plant protein content of 85% (Figure 4).

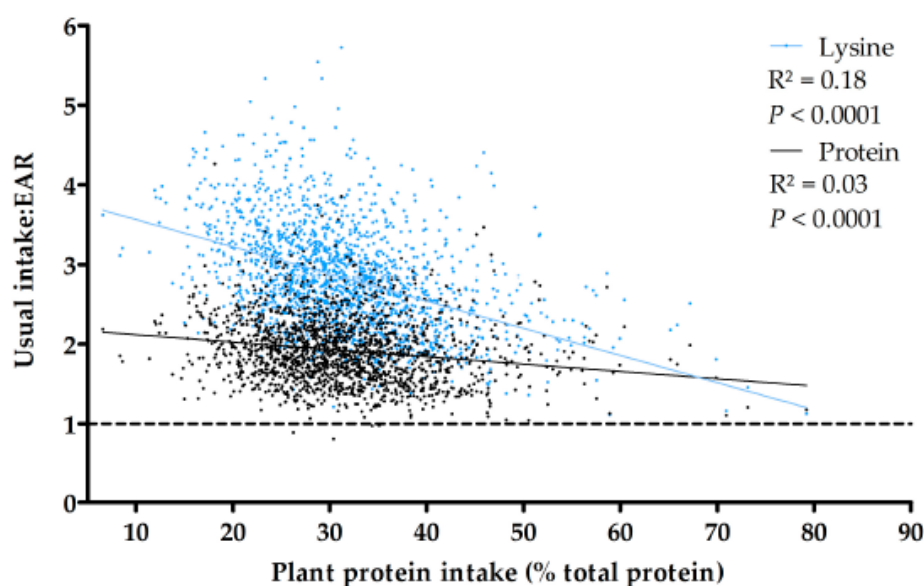


Figure 3. Association between protein and lysine intakes: EAR ratios and plant protein intake (% of total protein) in the diets. Points represent individuals of the French adult population (INCA2 study, $n = 1678$). The slopes of the linear regressions were significantly ($p < 0.001$) different from 0.

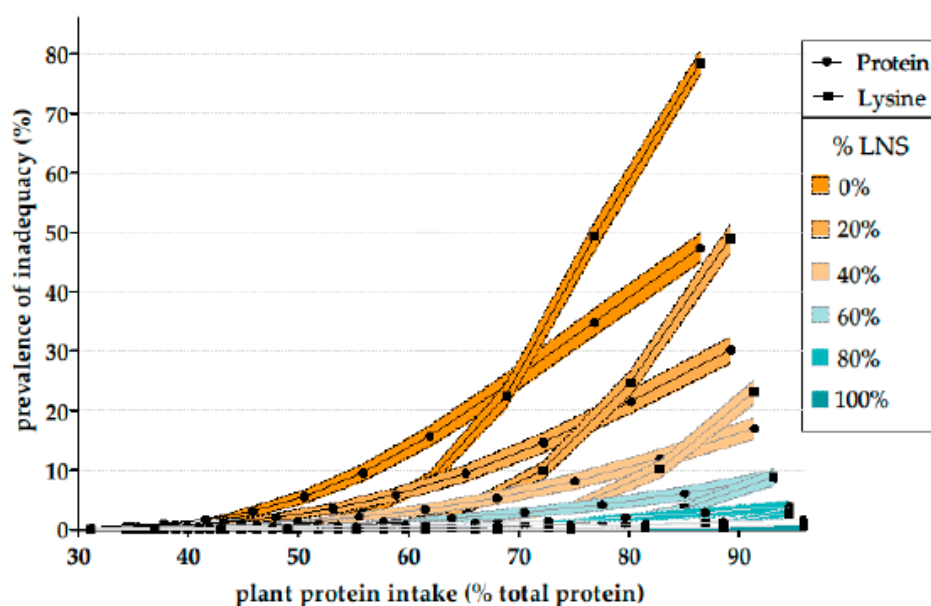


Figure 4. Prevalence of protein and lysine adequacy (% of the INCA2 study population, $n = 1678$) in simulations of a reduction in animal protein intake by gradually balancing it against the same amount of energy from a substituting combination composed of plant foods already consumed by individuals and a mixture of legumes, nuts and seeds. For example, the “40%” curves show the protein and lysine inadequacy when substituting animal protein by a combination of 40% of protein from legumes, nuts and seeds, and 60% of plant protein from foods already consumed by the individuals. The filled area represents the 95% confidence interval. LNS, Legumes, nuts and seeds.

According to the model substituting animal protein with legumes, nuts and seeds only (Model B), virtually the entire population had adequate protein and amino acid intake, at every level of plant protein in the diets. Results were similar according to the model that used as a substituting combination 80% legumes, nuts and seeds, and 20% of plant foods as already consumed (Model C₈₀). The probability of protein inadequacy reached 5% (3.96; 6.04) when the mean plant protein contribution to total protein intake was >80%, 66% and 55% in models C₆₀, C₄₀ and C₂₀, respectively. Lysine inadequacy became higher than protein inadequacy when the mean percentage of plant protein in the diets were >93%, 84%, 77% in models C₆₀, C₄₀ and C₂₀ (Figure 4). Mean intake of legumes reach an average portion per day (150 g) for 50%, 53%, 60% and 75% of mean plant protein in models B, C₈₀, C₆₀ and C₄₀, respectively.

4. Discussion

In this study we evaluated the adequacy of protein and amino acid intake in a western adult population and assessed their sensitivity to changing the plant:animal protein ratio. We found that in the current situation, protein and amino acid intake is adequate in virtually all adults, but an increase in the plant:animal protein ratio might primarily lead to an inadequacy of protein, and an inadequacy of lysine at the highest plant:animal protein ratios if keeping with the current pattern of plant protein intake. The introduction of a higher proportion of legumes, nuts and seeds when substituting for animal protein led to an adequate protein and lysine intake with higher plant:animal protein in the diet.

4.1. Protein and Amino Acid Intakes and Adequacy Regarding Requirements

Using the most recent dietary intake data, our results showed that only 0.3% of the population had an inadequate protein intake and virtually all individuals had amino acid intakes higher than their requirements.

Protein intake and adequacy assessments produced similar results during the NHANES 2003–2004 study in the USA, except for women over 30 [13], and slightly higher results during the NHANES 2007–2010 study (3.8% of the population having inadequate intakes) [20]. In France, previous assessments generated results that were the same [14] or similar [37] to ours regarding protein intake and adequacy. A study assessing protein intake and adequacy worldwide revealed virtually no inadequacies in Eastern Europe and North America [38].

The mean amino acid intakes estimated were in line with those in a previous study in Japan [18] where only the proline intake was lower, a finding that could be explained by a higher consumption of dairy products in France [21,39]. Like the present study, this assessment did not produce any evidence of amino acid inadequacies. In the USA, amino acid intakes were assessed from the NHANES III (1988–1994) study [17] and the results were similar in men only, which can be explained by a low protein intake in women. In France, amino acid intake was assessed for lysine and methionine only and similar results were found [19] (see Table S2).

It is necessary to underline a degree of uncertainty regarding how protein bioavailability have been taken into account in this study. Indeed, although the Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) has been proposed as the most conceptually relevant approach to take account of bioavailability when estimating the quality of dietary protein, too few data are available on real ileal digestibility in humans and its use in the implementation of the DIAAS was not recommended until more data would become available. Furthermore, it has been acknowledged that using faecal digestibility can produce inaccurate results [1]. We therefore decided that the best option to account for differences in digestibility between plant and animal proteins in a mixed protein diet was to apply an average coefficient of 5% to lower plant protein intakes. Although some uncertainties are attached to estimating this coefficient, it is derived from the most precise estimates of the real ileal digestibility of a set of animal and plant proteins in humans [5]. It is uncertain whether this estimate will remain accurate in the coming years when new measurements on a wider variety of foods will be carried out as recommended in the FAO 2013 report [1]. The approach of assessing protein and amino acid adequacy separately bears some similarities with the amino acid scores concept. If the protein adequacy was

adjusted for amino acid score, the protein adequacy would have been equal to the lysine adequacy from a mean plant protein content of 70% in the model A.

The Multiple Source Method used to assess usual protein and amino acids intake hypothesizes a statistical independence between the short-term records of food intake [32], whereas the seven days of records in INCA2 were on consecutive days. However, seven days of records clearly increase the precision of assessment as compared to two days. A Food Frequency Questionnaire was not required to assess usual intake for protein and amino acids, which are consumed every day.

4.2. Foods Contributing to Protein and Amino Acid Intakes

Although cereals contain less protein than other food products (e.g., 15% protein as percentage of energy for cooked pasta, 50–80% for meat and 25–30% for legumes in this study), they contributed 21% to total protein intake, as they were widely consumed. However, cereals contain less lysine than other food products (e.g., 3 g/100 g of protein for cooked pasta, 9 g/100 g protein for red meat and 7 g/100 g protein for legumes). As a result, cereals accounted for only 9% of the total lysine intake.

The foods contributing to total, animal and plant protein intakes appeared to be similar to those in the NHANES 2007–2010 study [7], although a comparison could not be drawn directly because the foods identified in this latter study were not broken down into ingredients as in the present study. In another study on an US population in 1999–2002, the percentages of plant protein (34%) and eggs, pork, seafood intakes were similar, whereas the poultry intake was higher and beef and dairy intakes were lower than during the present study [40]. In Europe, the percentage of plant protein was found to be similar to our study, except in Italy [6] and, as in the present study, the cereals were the highest contributor to plant protein intake (from 45% to 70% depending on the country). In view of these similarities, it can be assumed that the French diet may be representative of a western diet with regards the levels and patterns of plant and animal proteins in the diet.

4.3. Association between Protein and Lysine Adequacy and Dietary Plant Protein Intake

There was a significant inverse association between the percentage of plant protein in the diet and the total protein intake, but the slope was low. Even with the highest levels of plant protein, intake was higher than the requirements in practically the entire study population. These results were in line with the U.S. report by the Dietary Guidelines Advisory Committee [12]. The extrapolation of regression lines for higher plant protein percentages did not suggest any potential inadequacy of protein intake. By contrast, the same extrapolation for lysine intake suggested that lysine adequacy could be of concern at very high plant protein intakes. However, because the range of plant protein intake in our population was relatively narrow (5th percentile, P5 = 19%; 95th percentile, P95 = 45%), an extrapolation to higher plant protein intake should be made with caution (Figure 2).

Using a model adjusting for protein intake (Model P), we simulated that the prevalence of inadequate amino acid intakes in the population would reach 5%, with a mean plant protein content of 85% (P5 = 70%, P95 = 97%) in the diet, mostly because of lysine inadequacy (those of other amino acids always being lower than that of lysine). However, the simulated increase in energy intake was unrealistic (with a mean energy intake of ~4000 kcal for an 85% plant protein content). This could be ascribed to the high contribution of cereal foods to plant protein intake in the population. This result well illustrates the point that the plant protein foods consumed at present contain a low percentage of protein relative to energy, when compared with animal protein sources, as shown in the literature [41]. We considered this model to be unrealistic because it involves very large increases in energy intake while maintaining protein intake at a constant level. However, it can be pointed out that this is what the application of the protein leverage hypothesis [42] would imply in the context of such changes in protein sources.

Using a second model adjusting for energy intake (Model A), we simulated that above a mean 50% plant protein content in the diet (P5 = 38%, P95 = 64%), protein intake was inadequate, thus further illustrating the point that the plant-based foods consumed at present are too low in protein when

compared to animal-based foods for a safe increase in plant:animal protein intake. Another important finding of this latter model was that up to a mean level of 70% (P5 = 56%, P95 = 80%) plant protein, the main issue was total protein intake and not the adequacy of lysine intake. The quality of the dietary protein consumed only became a critical parameter at plant protein intakes higher than a mean of 70%. That lysine was the most limiting of the individual amino acid could be clearly ascribed, again, to the importance of cereals to the plant protein intake of the population. However, a low protein:energy ratio appeared to be a more critical parameter than a low lysine:protein ratio.

These models and simulations were based on the hypothesis that the reduction in animal protein intake was the same in each individual's animal food items, and the increase in plant protein intake was also the same in each individual's plant protein food items. Therefore, the conclusions of these models would only apply to the situation where people would not modify their plant protein intakes while consuming less animal protein. This may not be the case if the population is managing the pattern of protein intake during this transition. Vegetarians or vegans, who often tend to have a lower protein intake than omnivores [15,16,43], consume more greens and beans, more seaweeds and plant proteins than omnivores [15], and more legumes [6] or soy proteins [16]. By contrast, it is possible that a rapid change toward less animal protein in the more general population with less nutritional knowledge may cause changes to the plant:animal protein ratio with a similar pattern of plant protein sources, therefore resulting in protein inadequacy as simulated in model A.

To go further in the analysis and use more realistic models than models P and A, we simulated the introduction of various proportions of legumes, nuts and seeds to substitute animal protein, as these foods have higher protein:energy ratios than cereals and are often advocated as the most valuable substitute for animal protein. These modellings (Models B, C₂₀, C₄₀, C₆₀ and C₈₀) showed that favoring legumes, nuts and seeds over the plant foods already consumed when substituting for animal protein allowed adequate protein and amino acids intakes for high proportions of plant protein in the diets. With high plant protein intake, securing protein and amino acids adequacy requires important changes in the pattern of plant protein sources as cereals and legumes, nuts and seeds, which may be viewed as an important obstacle to implement such a transition for the general population. This is not surprising since these protein models simulate up to a vegan diet for the entire population. However, conversely, and more relevant to the years to come, we could show that intermediary, yet important, transitions (i.e., resulting in 50 or 60% of plant protein) requires minor changes in the dietary pattern.

It should be noted that we restricted our study to the issue of protein and amino acid adequacy and did not consider the adequacy of other nutrients, which need to be considered in order to estimate the overall alignment with nutrient requirements of diets containing varying levels of plant proteins. In this regard, studies have shown that the diets of vegans or vegetarians have a higher nutritional quality than those of omnivores [15], with plant protein being associated with a higher overall nutrient adequacy [8,44]; the higher nutritional qualities of diets are estimated for individuals with high percentages of energy obtained from plant-based products [45,46]. The degree to which these relationships might vary with changes to the patterns of plant protein sources that seem to be necessary to ensure protein and amino acid adequacy when increasing the share of plant protein in the diet, remains unknown.

5. Conclusions

We conclude that if the population continues to follow the same plant protein food structure, which is low in protein, the adequacy of protein intake is not compromised until the average plant protein percentage rises from 30% to 50%. In this case, there is no primary question of lysine adequacy, but of protein in general. Under the same assumptions concerning the plant protein food pattern, there are no limitations specifically due to lysine with contribution of <70% of plant protein. Adequate protein and amino acids intake with high plant:animal protein ratios in the diet requires changes in the pattern of plant protein intake. Protein and lysine adequacy is efficiently secured when favoring

legumes, nuts and seeds in the substitution, which is ascribed to their higher protein:energy ratios as compared to cereals.

Our findings call for further studies to simulate individual dietary modifications in a general population that might lead to a different balance of the plant:animal protein ratio, and to assess the nutritional quality of these changes using an overall evaluation of the nutrient adequacy of various diets.

Supplementary Materials: The following are available online at www.mdpi.com/2072-6643/9/12/1333/s1, Method S1: French amino acid database, Table S1: Estimated average requirements of adults for protein and amino acids, from the 2002 Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition, Table S2: Means and standard deviations of protein and amino acid intakes in the total population of both men and women (mg/kg b.w./day) compared with previous studies, Table S3: Means and standard deviations of protein and amino acid intakes stratified by gender and age (mg/kg b.w./day), Table S4: Means and standard deviations of protein and amino acid intakes stratified by gender and Body Mass Index (BMI) (mg/kg b.w./day), Table S5: Animal and plant food groups contributing to protein and amino acid intakes (%).

Author Contributions: E.G., F.M. and J.-F.H. designed the study. E.G. analyzed the data, performed the statistical analysis and wrote the first draft of the manuscript; F.M., J.-F.H., E.O.V. and C.M.B. contributed to writing the manuscript and offered critical comments; E.G., F.M. and J.-F.H. interpreted the results; E.G. and F.M. had primary responsibility for the final content; and all authors read and approved the final manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. FAO Expert Consultation. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. *FAO Food Nutr. Pap.* **2011**, *92*, 1–66.
2. Anses. Actualisation des Repères du PNNS: Élaboration des Références Nutritionnelles. Rapport D'expertise Collective; 2016. Available online: www.anses.fr/fr/system/files/nut2012sa0103ra-2.pdf (accessed on 15 March 2017).
3. Millward, D.J. The nutritional value of plant-based diets in relation to human amino acid and protein requirements. *Proc. Nutr. Soc.* **1999**, *58*, 249–260. [CrossRef] [PubMed]
4. Tome, D. Digestibility issues of vegetable versus animal proteins: Protein and amino acid requirements—Functional aspects. *Food Nutr. Bull.* **2013**, *34*, 272–274. [CrossRef] [PubMed]
5. Mariotti, F. 35-plant protein, animal protein, and protein quality. In *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*; Mariotti, F., Ed.; Academic Press: Cambridge, CA, USA, 2017; pp. 621–642.
6. Halkjaer, J.; Olsen, A.; Bjerregaard, L.; Deharveng, G.; Tjønneland, A.; Welch, A.; Crowe, F.; Wirfält, E.; Hellstrom, V.; Niravong, M. Intake of total, animal and plant proteins, and their food sources in 10 countries in the European prospective investigation into cancer and nutrition. *Eur. J. Clin. Nutr.* **2009**, *63*, S16–S36. [CrossRef] [PubMed]
7. Phillips, S.M.; Fulgoni, V.L.; Heaney, R.P.; Nicklas, T.A.; Slavin, J.L.; Weaver, C.M. Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. *Am. J. Clin. Nutr.* **2015**, *101*, 1346S–1352S. [CrossRef] [PubMed]
8. Camilleri, G.M.; Verger, E.O.; Huneau, J.-F.; Carpentier, F.; Dubuisson, C.; Mariotti, F. Plant and animal protein intakes are differently associated with nutrient adequacy of the diet of French adults. *J. Nutr.* **2013**, *143*, 1466–1473. [CrossRef] [PubMed]
9. FranceAgriMer. Impact de la Crise Economique sur la Consommation de Viande et Evolution des Comportements Alimentaires. Les Synthèses de FranceAgriMer. June 2015. Available online: <http://www.civ-viande.org/2015/06/26/impact-de-la-crise-economique-sur-la-consommation-de-viandes-et-evolutions-des-comportements-alimentaires/> (accessed on 15 March 2017).
10. Clonan, A.; Wilson, P.; Swift, J.A.; Leibovici, D.G.; Holdsworth, M. Red and processed meat consumption and purchasing behaviours and attitudes: Impacts for human health, animal welfare and environmental sustainability. *Public Health Nutr.* **2015**, *18*, 2446–2456. [CrossRef] [PubMed]
11. Anses. Actualisation des Repères du PNNS: Étude des Relations Entre Consommation de Groupes D'aliments et Risque de Maladies Chroniques Non Transmissibles. Rapport D'expertise Collective; 2016. Available online: www.anses.fr/en/system/files/nut2012sa0103ra-3.pdf (accessed on 15 March 2017).

12. Dietary Guidelines Advisory Committee. *Report of the Dietary Guidelines Advisory Committee on the Dietary Guidelines for Americans, 2010, to the Secretary of Agriculture and the Secretary of Health and Human Services*; U.S. Government Printing Office: Washinton, DC, USA, 2010.
13. Fulgoni, V.L. Current protein intake in america: Analysis of the national health and nutrition examination survey, 2003–2004. *Am. J. Clin. Nutr.* **2008**, *87*, 1554S–1557S. [PubMed]
14. AFSSA. Apport en Protéines: Consommation, Qualité, Besoins et Recommandations. Available online: www.anses.fr/fr/system/files/nut-ra-proteines.pdf (accessed on 15 March 2017).
15. Clarys, P.; Deliens, T.; Huybrechts, I.; Deriemaeker, P.; Vanaelst, B.; De Keyzer, W.; Hebbelinck, M.; Mullie, P. Comparison of nutritional quality of the vegan, vegetarian, semi-vegetarian, pesco-vegetarian and omnivorous diet. *Nutrients* **2014**, *6*, 1318–1332. [CrossRef] [PubMed]
16. Rizzo, N.S.; Jaceldo-Siegl, K.; Sabate, J.; Fraser, G.E. Nutrient profiles of vegetarian and nonvegetarian dietary patterns. *J. Acad. Nutr. Diet.* **2013**, *113*, 1610–1619. [CrossRef] [PubMed]
17. Trumbo, P.; Schlicker, S.; Yates, A.A.; Poos, M. Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein and amino acids. *J. Am. Diet. Assoc.* **2002**, *102*, 1621–1630. [CrossRef]
18. Suga, H.; Murakami, K.; Sasaki, S. Development of an amino acid composition database and estimation of amino acid intake in japanese adults. *Asia Pac. J. Clin. Nutr.* **2013**, *22*, 188–199. [PubMed]
19. Martin, A.; Touvier, M.; Volatier, J.-L. The basis for setting the upper range of adequate intake for regulation of macronutrient intakes, especially amino acids. *J. Nutr.* **2004**, *134*, 1625S–1629S. [PubMed]
20. Cifelli, C.J.; Houchins, J.A.; Demmer, E.; Fulgoni, V.L. Increasing plant based foods or dairy foods differentially affects nutrient intakes: Dietary scenarios using nhanes 2007–2010. *Nutrients* **2016**, *8*, 422. [CrossRef] [PubMed]
21. Dubuisson, C.; Lioret, S.; Touvier, M.; Dufour, A.; Calamassi-Tran, G.; Volatier, J.-L.; Lafay, L. Trends in food and nutritional intakes of french adults from 1999 to 2007: Results from the inca surveys. *Br. J. Nutr.* **2010**, *103*, 1035–1048. [CrossRef] [PubMed]
22. Henry, C. Basal metabolic rate studies in humans: Measurement and development of new equations. *Public Health Nutr.* **2005**, *8*, 1133–1152. [CrossRef] [PubMed]
23. Black, A.E. Critical evaluation of energy intake using the goldberg cut-off for energy intake: Basal metabolic rate. A practical guide to its calculation, use and limitations. *Int. J. Obes.* **2000**, *24*, 1119. [CrossRef]
24. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for energy. *EFSA J.* **2013**, *11*, 3005.
25. Rand, W.M.; Pellett, P.L.; Young, V.R. Meta-analysis of nitrogen balance studies for estimating protein requirements in healthy adults. *Am. J. Clin. Nutr.* **2003**, *77*, 109–127. [PubMed]
26. Centre d'Information des Viandes & INRA. Valeurs Nutritionnelles des Viandes. Available online: <http://www.lessentiellesviandes-pro.org/pdf/PDF-tous%20morceaux.pdf> (accessed on 8 March 2017).
27. U.S. Department of Agriculture; The Agricultural Research Service. Usda Branded Food Products Database. Nutrient Data Laboratory Home Page. 2016. Available online: <http://ndb.nal.usda.gov> (accessed on 8 March 2017).
28. Subdivision on Resources, Council for Science and Technology, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). Standard Tables of Food Composition in Japan (Seventh Revised Edition). 2015. Available online: http://www.mext.go.jp/en/policy/science_technology/policy/title01/detail01/sdetail01/sdetail01/1385122.htm (accessed on 8 March 2017).
29. Health Canada. Canadian Nutrient File. 2015. Available online: <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/nutrition/fiche-nutri-data/index-eng.php> (accessed on 8 March 2017).
30. The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited. New Zealand Food Composition Database: New Zealand Foodfiles 2014 Version 01. 2015. Available online: <http://www.foodcomposition.co.nz/foodfiles> (accessed on 30 October 2016).
31. Oberli, M.; Marsset-Baglieri, A.; Airinei, G.; Sante-Lhoutellier, V.; Khodorova, N.; Remond, D.; Foucault-Simonin, A.; Piedcoq, J.; Tome, D.; Fromentin, G.; et al. High true ileal digestibility but not postprandial utilization of nitrogen from bovine meat protein in humans is moderately decreased by high-temperature, long-duration cooking. *J. Nutr.* **2015**, *145*, 2221–2228. [CrossRef] [PubMed]
32. Haubrock, J.; Nöthlings, U.; Volatier, J.-L.; Dekkers, A.; Ocké, M.; Harttig, U.; Illner, A.-K.; Knüppel, S.; Andersen, L.F.; Boeing, H.; et al. Estimating usual food intake distributions by using the multiple source method in the epic-potsdam calibration study. *J. Nutr.* **2011**, *141*, 914–920. [CrossRef] [PubMed]

33. Harttig, U.; Haubrock, J.; Knuppel, S.; Boeing, H. The msM program: Web-based statistics package for estimating usual dietary intake using the multiple source method. *Eur. J. Clin. Nutr.* **2011**, *65*, S87–S91. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. Institute of Medicine (U.S.) Subcommittee on Interpretation and Uses of Dietary Reference Intakes. *Dietary Reference Intakes: Applications in Dietary Assessment*; Institute of Medicine (U.S.) Subcommittee on Interpretation and Uses of Dietary Reference Intakes: Washington, DC, USA, 2000.
35. National Research Council. *Nutrient Adequacy: Assessment Using Food Consumption Surveys*; National Academies Press: Washington, DC, USA, 1986.
36. Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition (2002: Geneva, Switzerland); Food and Agriculture Organization of the United Nations; World Health Organization; United Nations University. *Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition: Report of a Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation*; WHO Technical Report Series; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2007; Volume 935, p. 256.
37. Perignon, M.; Barré, T.; Gazan, R.; Amiot, M.-J.; Darmon, N. The bioavailability of iron, zinc, protein and vitamin A is highly variable in french individual diets: Impact on nutrient inadequacy assessment and relation with the animal-to-plant ratio of diets. *Food Chem.* **2018**, in press. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
38. Ghosh, S.; Suri, D.; Uauy, R. Assessment of protein adequacy in developing countries: Quality matters. *Br. J. Nutr.* **2012**, *108*, S77–S87. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
39. Miyake, Y.; Tanaka, K.; Fukushima, W.; Sasaki, S.; Kiyohara, C.; Tsuboi, Y.; Yamada, T.; Oeda, T.; Miki, T.; Kawamura, N.; et al. Lack of association of dairy food, calcium, and vitamin D intake with the risk of parkinson's disease: A case-control study in Japan. *Parkinsonism Relat. Disord.* **2011**, *17*, 112–116. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Lin, P.-H.; Miwa, S.; Li, Y.-J.; Wang, Y.; Levy, E.; Lastor, K.; Champagne, C. Factors influencing dietary protein sources in the premier trial population. *J. Am. Diet. Assoc.* **2010**, *110*, 291–295. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
41. Bohrer, B.M. Review: Nutrient density and nutritional value of meat products and non-meat foods high in protein. *Trends Food Sci. Technol.* **2017**, *65*, 103–112. [[CrossRef](#)]
42. Simpson, S.J.; Raubenheimer, D. Obesity: The protein leverage hypothesis. *Obes. Rev.* **2005**, *6*, 133–142. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
43. Scarborough, P.; Appleby, P.N.; Mizdrak, A.; Briggs, A.D.M.; Travis, R.C.; Bradbury, K.E.; Key, T.J. Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK. *Clim. Chang.* **2014**, *125*, 179–192. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
44. Bianchi, C.M.; Egnell, M.; Huneau, J.-F.; Mariotti, F. Plant protein intake and dietary diversity are independently associated with nutrient adequacy in french adults. *J. Nutr.* **2016**, *146*, 2351–2360. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
45. Vieux, F.; Soler, L.-G.; Touazi, D.; Darmon, N. High nutritional quality is not associated with low greenhouse gas emissions in self-selected diets of french adults. *Am. J. Clin. Nutr.* **2013**, *97*, 569–583. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
46. Masset, G.; Vieux, F.; Verger, E.O.; Soler, L.-G.; Touazi, D.; Darmon, N. Reducing energy intake and energy density for a sustainable diet: A study based on self-selected diets in french adults. *Am. J. Clin. Nutr.* **2014**, *99*, 1460–1469. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]



© 2017 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Online supporting material

Method S1: French amino acid database

An amino acid database was developed for the 1337 food items in the full repertoire of adults in the INCA2 study, using a method adapted from a study that described the development of an amino acid database in Japan by Suga et al. (1).

Sources of amino acid content

The amino acid contents of different food items were collected from published French sources (2), and international databases (USDA, Health Canada, the Standard Tables of Food Composition in Japan and the New Zealand Food Composition Database). These data came from amino acid analytical data obtained using automatic amino acid analyzers (with ion-exchange chromatography) or high performance liquid chromatography (HPLC). Each amino acid content was converted into mg/100 g of protein.

Assignment with INCA2 food items

To assign the amino acid contents of the foods analyzed to INCA2 food items, we used a 6-step procedure, as follows (Table 1):

Step 1: Direct analytical data from French published sources

Very few analyses had been performed on French foods using chromatographic methods to analyze 18 amino acids. Data from a study on the nutritional value of meat by the Centre d'Information des Viandes were used for most of the beef, veal, lamb, horse meat and offal food items (n=28) (2).

Step 2: Direct analytical data from international databases

The amino acid compositions of foods obtained from four international databases were used to complete the French analyses (3-6).

To determine the similarity of the foods, we used food item descriptors (taking account of the name of the product and cooking/process information), and the macronutrient content of foods (total fat, carbohydrates, protein, water and energy intake). A “similarity score” (S-score) was developed to assess the nutrient similarity between foods in the INCA2 survey and the food items found in international database:

$$S\text{-score} = |Fat_i - Fat_{INCA2}| + |Carb_i - Carb_{INCA2}| + |Prot_i - Prot_{INCA2}| + |Wat_i - Wat_{INCA2}| + |(En_i - En_{INCA2})/5|$$

i: food from international database, INCA2: food from the INCA2 study, Fat: total fat content (g/100g), Carb: total carbohydrate content (g/100g), Prot: total protein content (g/100g), Wat: total water content (g/100G), En: total energy (kcal/100g)

NB: The energy intake was divided by five as this ranges from P5 = 13kcal/100g to p95=511 kcal/100g, whereas other nutrients are expressed as a percentage.

Only foods with a similar name and cooking process, and an S-score <= 20 were assigned to INCA2 foods (n=435).

Step 3: Data based on “similar” food items

When no direct analytical data corresponded to INCA2 food items, assignments were made with “similar” food items. First of all (a), if data were available for a different form of the same food (e.g. cooked and not raw), we hypothesized that the amino acid profiles of the proteins were not modified by the cooking processes and we assigned data from a different form of the same food to the INCA2

food items (n = 189). Then (b), if data were unavailable for a food item but existed for similar species (e.g. food from different cuts of the same animal), we assigned the similar food to the INCA2 food item (n = 28).

Step 4: Use of recipes to break down mixed food items

Mixed INCA2 food items for which no data were found (e.g. chili con carne or lasagna) were broken down into ingredients using the INCA2 recipe table, and the food item amino acid content was calculated as a combination of the amino acid contents of its ingredients (n=409).

Step 5: Non-analytical data from international databases

When INCA2 food items with no corresponding data from previous steps had a corresponding food item from non-analytical data in international databases (e.g. mangos or guavas), the amino acid content of these data were used (n=28).

Step 6: Assignment to 0 for foods containing no or very little protein

The amino acid content of the remainder of the INCA2 food items was assigned to 0 as these foods contained no or very low protein contents (e.g. oil or alcoholic beverages). Those food items contributed less than 0.1% to the total protein intake in INCA2 (n=223).

Table 1: Number of INCA2 food items assigned at each step of the procedure

Step	Number of INCA2 food items
1	28
2	435
3	217
4	409
5	28
6	220

Calculation of the amino acid contents of foods

The contents in amino acids per 100g of food were calculated as follows:

$$[Amino\ acid]_{INCA2} (mg/100g\ food) = [Amino\ acid]_{other} (mg/100g\ protein) / 100 * [Protein]_{INCA2} (g/100g\ food)$$

When an INCA2 food item corresponded to more than one food item from other sources, the amino acid value used was the mean of the corresponding values for the food item, weighted by the S-Score.

Assessment of database quality

Five grades (A+, A, B, C, D) were assigned to each INCA2 food item in order to define the quality of the value (Table 2). The grade rose if:

- the data was not from French analyses,
- it was not the same form of the food,
- a biologically similar food was used,
- a recipe was used to break down the food into ingredients,
- a non-analytical value was used,
- the value was estimated to be 0,
- the S-score was >10.

The grade fell if:

- more than one food item from the international databases corresponded to the INCA2 food item, and the mean coefficient of variation of the different amino acid values in these items was <10%.

Table 2: Quality of the amino acid data for INCA2 food items

Quality of the INCA2 food item	Number of INCA2 food items
A+	42
A	255
B	908
C	116
D	16

Validation of the database

FAO/INFOODS guideline checks were used to validate the database (7).

- The checks on food identification were completed because the data came from international databases and accurate publications. Moreover, other foods were assigned to INCA2 food categories according to the similarity of precise names and macronutrient contents. However, the assignments of INCA2 food items to different forms of the same food or foods of similar species did not comply with these guidelines. The scoring system was applied to address this issue.
- The checks on components were not necessary as only amino acid values per 100g of protein were used. To assess the validity of using different sources in the database, the coefficients of variation of the amino acid contents for each food group of the INCA2 nomenclature were calculated. It appeared that among the 40% most homogeneous groups (meat, dairy products, eggs, fish, rice, wheat, bread, pasta, etc.), the mean CV values for amino acids were <10%. Less homogeneous groups which accounted for 29% of the groups (legumes, sandwiches, cakes, offal, potatoes, vegetables, etc.) had mean CV values of between 10% and 20%. Finally, the 31% least homogeneous groups (vegetables dishes, vegetables, fruits, juices, seasonings, etc.) had mean CV values >20. This suggested that even though the data came from a combination of different sources, foods of the same origin had similar amino acid profiles.
- The checks on recipes were verified as the recipes came from the Anses INCA2 recipe table.
- The checks on data documentation were not always complied with in the international databases. Indeed, and particularly for amino acids, the number of foods analyzed and their standard deviations were rarely complete. However, given the reputation of the international databases it can be assumed that the data were reliable.

Table S1: Estimated average requirements of adults for protein and amino acids, from the 2002 Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition (8)

Nutrient	EAR (mg/kg b.w./d)
Protein	660
Valine	26
Tryptophan	4
Threonine	15
Sulphur	15
Lysine	30
Leucine	39
Isoleucine	20
Histidine	10
Aromatic	25

Table S2: Means and standard deviations of protein and amino acid intakes in the total population of both men and women (mg/kg b.w./d) compared with previous studies

Nutrient	INCA2 (2006 – 2007)			Suga et al. (1)		Martin et al. (9) ¹	Trumbo et al. (10) ²	
	Total	Men	Women	Men	Women	Total	Men	Women
Aspartic acid	111 (±29)	114 (±30)	109 (±27)	109	114	-	114	93
Alanine	62 (±17)	64 (±18)	59 (±16)	60	61	-	64	52
Arginine	69 (±19)	72 (±20)	66 (±17)	70	71	-	74	60
Cysteine	18 (±5)	19 (±5)	17 (±4)	18	19	-	17	14
Glutamic acid	259 (±64)	270 (±68)	250 (±59)	212	226	-	259	216
Glycine	53 (±15)	56 (±16)	51 (±14)	55	55	-	57	46
Histidine	38 (±10)	39 (±11)	36 (±9)	41	41	-	38	31
Isoleucine	57 (±14)	59 (±16)	55 (±13)	51	53	-	61	50
Leucine	102 (±26)	106 (±28)	99 (±24)	91	95	-	104	86
Lysine	88 (±24)	91 (±26)	85 (±23)	77	80	87	92	75
Methionine	31 (±8)	32 (±9)	30 (±8)	28	28	30	31	25
Phenylalanine	58 (±14)	60 (±15)	56 (±13)	53	55	-	58	48
Proline	92 (±23)	96 (±25)	89 (±22)	66	72	-	87	72
Serine	60 (±15)	62 (±16)	59 (±14)	55	58	-	60	50
Threonine	52 (±14)	54 (±15)	50 (±13)	47	49	-	52	43
Tryptophan	15 (±4)	15 (±4)	14 (±3)	14	15	-	16	13
Tyrosine	46 (±12)	48 (±13)	45 (±11)	41	43	-	48	39
Valine	66 (±17)	68 (±18)	64 (±16)	60	63	-	52	56
Protein	1289 (±320)	1336 (±341)	1247 (±300)	-	-	-	1274	1056

¹ Intakes (mg/d) were converted to mg/kg b.w./day considering a body weight of 70kg

² Intakes (mg/d) were converted to mg/kg b.w./day considering a body weight of 60kg for women and 75kg for men

Table S3: Means and standard deviations of protein and amino acid intakes stratified by gender and age (mg/kg b.w./d)

	Men				Women			
	18 - 24 (n=67)	25 - 34 (n=114)	35 - 49 (n=249)	50 - 65 (n=287)	18 - 24 (n=95)	25 - 34 (n=204)	35 - 49 (n=349)	50 - 65 (n=313)
Aspartic acid	120 (± 40)	114 (± 39)	114 (± 29)	112 (± 25)	108 (± 34)	108 (± 26)	111 (± 29)	108 (± 25)
Alanine	69 (± 24)	65 (± 24)	64 (± 16)	63 (± 14)	60 (± 20)	59 (± 15)	60 (± 16)	58 (± 14)
Arginine	76 (± 27)	72 (± 25)	72 (± 19)	70 (± 16)	67 (± 23)	66 (± 17)	68 (± 18)	64 (± 15)
Cysteine	20 (± 7)	19 (± 6)	19 (± 5)	18 (± 4)	18 (± 6)	18 (± 4)	18 (± 5)	17 (± 4)
Glutamic acid	286 (± 88)	273 (± 82)	270 (± 64)	262 (± 58)	252 (± 73)	253 (± 57)	255 (± 62)	239 (± 53)
Glycine	60 (± 21)	56 (± 20)	56 (± 15)	55 (± 12)	52 (± 18)	51 (± 13)	52 (± 14)	50 (± 12)
Histidine	41 (± 15)	40 (± 14)	39 (± 10)	38 (± 9)	36 (± 11)	36 (± 9)	37 (± 10)	35 (± 8)
Isoleucine	62 (± 20)	60 (± 19)	59 (± 14)	57 (± 13)	55 (± 17)	55 (± 13)	56 (± 14)	53 (± 12)
Leucine	112 (± 36)	108 (± 36)	106 (± 25)	103 (± 24)	99 (± 30)	99 (± 24)	101 (± 25)	96 (± 21)
Lysine	96 (± 35)	92 (± 33)	90 (± 24)	89 (± 22)	84 (± 28)	84 (± 22)	86 (± 23)	83 (± 20)
Methionine	35 (± 12)	33 (± 12)	32 (± 8)	31 (± 7)	30 (± 10)	30 (± 8)	31 (± 8)	29 (± 7)
Phenylalanine	64 (± 19)	61 (± 19)	60 (± 14)	59 (± 13)	57 (± 16)	57 (± 13)	58 (± 14)	55 (± 12)
Proline	101 (± 32)	98 (± 28)	96 (± 24)	92 (± 22)	90 (± 25)	91 (± 21)	92 (± 23)	84 (± 19)
Serine	66 (± 20)	63 (± 19)	62 (± 15)	60 (± 13)	59 (± 17)	59 (± 13)	60 (± 15)	57 (± 12)
Threonine	58 (± 19)	55 (± 19)	54 (± 13)	52 (± 12)	51 (± 16)	51 (± 12)	52 (± 13)	49 (± 11)
Tryptophan	16 (± 5)	15 (± 5)	15 (± 4)	15 (± 3)	14 (± 4)	14 (± 3)	15 (± 4)	14 (± 3)
Tyrosine	50 (± 16)	49 (± 16)	48 (± 12)	47 (± 11)	45 (± 13)	45 (± 11)	46 (± 12)	44 (± 10)
Valine	72 (± 22)	69 (± 22)	68 (± 16)	66 (± 15)	65 (± 19)	64 (± 15)	66 (± 16)	62 (± 14)
Protein	1410 (± 441)	1352 (± 428)	1336 (± 315)	1302 (± 285)	1251 (± 372)	1251 (± 289)	1277 (± 312)	1208 (± 264)

Table S4: Means and standard deviations of protein and amino acid intakes stratified by gender and Body Mass Index (BMI) (mg/kg b.w./d)

	Men			Women		
	Normal weight (n=401)	Pre-obesity (n=244)	Obesity (n=72)	Normal weight (n=713)	Pre-obesity (n=176)	Obesity (n=72)
Aspartic acid	120 (+/- 33)	110 (+/- 24)	94 (+/- 21)	113 (+/- 28)	100 (+/- 23)	85 (+/- 19)
Alanine	68 (+/- 20)	62 (+/- 14)	53 (+/- 12)	61 (+/- 16)	54 (+/- 12)	46 (+/- 11)
Arginine	76 (+/- 22)	69 (+/- 16)	59 (+/- 13)	69 (+/- 18)	61 (+/- 14)	51 (+/- 12)
Cysteine	20 (+/- 5)	18 (+/- 4)	15 (+/- 3)	18 (+/- 4)	16 (+/- 3)	13 (+/- 3)
Glutamic acid	285 (+/- 71)	259 (+/- 57)	216 (+/- 41)	261 (+/- 60)	222 (+/- 42)	191 (+/- 38)
Glycine	59 (+/- 17)	54 (+/- 12)	46 (+/- 11)	53 (+/- 14)	47 (+/- 11)	39 (+/- 10)
Histidine	41 (+/- 12)	38 (+/- 9)	32 (+/- 7)	37 (+/- 10)	33 (+/- 7)	28 (+/- 7)
Isoleucine	62 (+/- 17)	56 (+/- 13)	48 (+/- 9)	57 (+/- 14)	50 (+/- 10)	42 (+/- 9)
Leucine	112 (+/- 30)	102 (+/- 23)	86 (+/- 17)	103 (+/- 25)	90 (+/- 18)	76 (+/- 17)
Lysine	95 (+/- 29)	87 (+/- 22)	75 (+/- 17)	87 (+/- 23)	78 (+/- 18)	66 (+/- 17)
Methionine	34 (+/- 10)	31 (+/- 7)	26 (+/- 6)	31 (+/- 8)	27 (+/- 6)	23 (+/- 6)
Phenylalanine	63 (+/- 16)	58 (+/- 13)	49 (+/- 10)	59 (+/- 14)	51 (+/- 10)	43 (+/- 9)
Proline	101 (+/- 26)	91 (+/- 22)	76 (+/- 15)	93 (+/- 22)	79 (+/- 15)	67 (+/- 12)
Serine	65 (+/- 17)	59 (+/- 13)	50 (+/- 10)	61 (+/- 14)	53 (+/- 10)	45 (+/- 9)
Threonine	57 (+/- 16)	52 (+/- 12)	44 (+/- 9)	52 (+/- 13)	46 (+/- 10)	39 (+/- 9)
Tryptophan	16 (+/- 4)	15 (+/- 3)	12 (+/- 2)	15 (+/- 4)	13 (+/- 3)	11 (+/- 2)
Tyrosine	51 (+/- 14)	47 (+/- 11)	39 (+/- 8)	47 (+/- 11)	41 (+/- 8)	35 (+/- 8)
Valine	72 (+/- 19)	65 (+/- 15)	55 (+/- 11)	67 (+/- 16)	58 (+/- 12)	50 (+/- 10)
Protein	1407 (+/- 363)	1283 (+/- 277)	1086 (+/- 212)	1297 (+/- 305)	1126 (+/- 224)	960 (+/- 204)

Table S5: Animal and plant food groups contributing to protein and amino acid intakes (%)

Nutrient	Aspartic acid		Alanine		Arginine		Cysteine		Glutamic acid		Glycine		Histidine		Isoleucine		Leucine		Lysine	
	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)
Animal	72.2 ± 8.2	69.7 ± 7.9	76.3 ± 7.4	75 ± 7	73.8 ± 8.4	72 ± 8	62.6 ± 10	61.9 ± 8.9	61.2 ± 9.7	61.2 ± 8.8	73.2 ± 8.5	71.9 ± 8.1	76.1 ± 7.6	75.4 ± 7.2	74.8 ± 7.6	74.2 ± 7	74.1 ± 7.7	73.7 ± 7.1	83.7 ± 5.9	82.5 ± 5.7
Meat	44.3 ± 14.2	37.1 ± 11.9	50.7 ± 14.6	44 ± 12.8	49.6 ± 14.6	43 ± 12.7	41.3 ± 13.8	36.1 ± 11.8	33.7 ± 12.5	28.7 ± 10	51.2 ± 14.4	44.8 ± 12.8	47.7 ± 14.5	41.8 ± 12.6	43.1 ± 14.2	36.7 ± 11.9	42.5 ± 14.2	36.3 ± 11.7	51 ± 15.3	43.5 ± 13.3
Red meat	21.1 ± 12.1	17.6 ± 9.8	24.5 ± 13.7	21.3 ± 11.4	23.8 ± 13.4	20.6 ± 11.1	22.1 ± 12.8	19.3 ± 10.6	16.1 ± 9.5	13.7 ± 7.8	24.7 ± 13.7	21.7 ± 11.6	22.6 ± 12.9	19.5 ± 10.7	20.6 ± 12	17.6 ± 9.8	20.3 ± 11.8	17.3 ± 9.7	23.7 ± 13.7	20.1 ± 11.2
Poultry	12 ± 11.5	10.2 ± 8.7	13.1 ± 12.3	11.6 ± 9.8	13.3 ± 12.4	11.7 ± 9.9	8.8 ± 8.7	7.7 ± 6.8	8.8 ± 8.8	7.6 ± 6.8	12.2 ± 11.5	11 ± 9.4	12.6 ± 12.2	11.4 ± 9.8	11.5 ± 11.2	10 ± 8.7	11.3 ± 11	9.8 ± 8.5	14.7 ± 13.7	12.8 ± 10.7
Game	0.4 ± 2.5	0.2 ± 1.1	0.4 ± 2.7	0.2 ± 1.4	0.4 ± 2.6	0.2 ± 1.3	0.3 ± 1.9	0.1 ± 1	0.3 ± 1.8	0.1 ± 0.9	0.4 ± 2.5	0.2 ± 1.3	0.5 ± 3	0.2 ± 1.6	0.4 ± 2.5	0.2 ± 1.2	0.4 ± 2.3	0.2 ± 1.1	0.5 ± 3	0.2 ± 1.5
Offal	0.8 ± 2.5	0.9 ± 2.4	0.9 ± 2.8	1 ± 2.7	0.9 ± 2.8	1 ± 2.7	1.3 ± 4.1	1.6 ± 4.2	0.5 ± 1.7	0.6 ± 1.5	1.1 ± 3.3	1.2 ± 3.1	0.7 ± 2.2	0.8 ± 2.2	0.8 ± 2.3	0.9 ± 2.3	0.8 ± 2.5	0.9 ± 2.5	0.9 ± 2.6	1 ± 2.5
Delicatessen	10 ± 6.7	8.2 ± 5.6	11.6 ± 7.7	9.9 ± 6.6	11.2 ± 7.4	9.4 ± 6.3	8.9 ± 5.8	7.4 ± 4.9	8 ± 5.1	6.6 ± 4.3	12.8 ± 8.6	10.8 ± 7.3	11.3 ± 7.3	9.8 ± 6.4	9.8 ± 6.4	8.1 ± 5.4	9.6 ± 6.3	8.1 ± 5.4	11.2 ± 7.6	9.4 ± 6.4
Fish	7.5 ± 7.6	9.4 ± 7.3	8.3 ± 8.5	10.7 ± 8.3	7.6 ± 7.7	10 ± 7.7	5.4 ± 5.7	7 ± 5.5	5 ± 5.3	6.5 ± 5.2	8.3 ± 8.5	11.1 ± 8.9	6.6 ± 7.5	8.4 ± 7.4	6.7 ± 7.1	8.6 ± 6.8	6.6 ± 6.9	8.5 ± 6.7	8.3 ± 8.6	10.7 ± 8.5
Dairy products	16.9 ± 8.6	18.8 ± 7.4	13.9 ± 7.4	15.7 ± 6.4	13.1 ± 6.9	14.5 ± 5.9	11.2 ± 5.8	12.7 ± 5.1	19.6 ± 9.1	22.2 ± 8	10.9 ± 6.1	12.3 ± 5.2	19 ± 9.5	21.6 ± 8.3	21.4 ± 10.1	24.3 ± 8.9	21.6 ± 10.2	24.5 ± 8.9	21.3 ± 10.9	24.3 ± 9.4
Milk	5.1 ± 5.7	6.3 ± 5.4	3.9 ± 4.4	4.9 ± 4.2	3.4 ± 3.7	4.3 ± 3.4	3.3 ± 3.3	4.1 ± 3.1	5.5 ± 6	7 ± 5.9	3 ± 3.3	3.8 ± 3.1	5.1 ± 5.8	6.4 ± 5.6	5.7 ± 6.3	7.2 ± 6.2	5.8 ± 6.4	7.3 ± 6.3	5.7 ± 6.7	7.2 ± 6.5
Yogurts	2.9 ± 3.8	4.3 ± 3.6	2.4 ± 3.2	3.7 ± 3.2	2.1 ± 2.8	3.2 ± 2.8	1.7 ± 2.3	2.7 ± 2.5	3.2 ± 4.1	4.9 ± 4.2	1.9 ± 2.5	2.8 ± 2.4	3 ± 3.8	4.5 ± 3.9	3.9 ± 4.9	5.9 ± 5	3.8 ± 4.7	5.7 ± 4.9	3.9 ± 4.9	5.9 ± 4.9
Cheese	8.5 ± 5.8	7.8 ± 4.8	7.2 ± 4.9	6.8 ± 4.3	7.2 ± 4.9	6.7 ± 4.2	5.9 ± 4.1	5.5 ± 3.4	10.4 ± 6.6	9.7 ± 5.7	5.8 ± 4.1	5.3 ± 3.4	10.6 ± 7	10.1 ± 6.2	11.3 ± 7.4	10.6 ± 6.4	11.6 ± 7.6	10.9 ± 6.6	11.4 ± 7.8	10.8 ± 6.8
Other	0.4 ± 0.3	0.4 ± 0.4	0.3 ± 0.3	0.4 ± 0.3	0.3 ± 0.2	0.4 ± 0.3	0.3 ± 0.3	0.4 ± 0.3	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.4	0.3 ± 0.2	0.3 ± 0.3	0.3 ± 0.3	0.4 ± 0.3	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.5	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.4	0.4 ± 0.3	0.4 ± 0.4
Eggs	3.5 ± 2.9	4.4 ± 3	3.5 ± 3	4.6 ± 3.2	3.5 ± 2.9	4.6 ± 3.2	4.6 ± 3.7	6.1 ± 4.1	2.9 ± 2.1	3.8 ± 2.2	2.7 ± 2.2	3.6 ± 2.4	2.8 ± 2.2	3.7 ± 2.5	3.6 ± 2.9	4.6 ± 3.1	3.4 ± 2.7	4.4 ± 2.9	3.1 ± 2.6	4 ± 2.9
Plant	27.8 ± 8.2	30.3 ± 7.9	23.7 ± 7.4	25 ± 7	26.2 ± 8.4	28 ± 8	37.4 ± 10	38.1 ± 8.9	38.8 ± 9.7	38.8 ± 8.8	26.8 ± 8.5	28.1 ± 8.1	23.9 ± 7.6	24.6 ± 7.2	25.2 ± 7.6	25.8 ± 7	25.9 ± 7.7	26.3 ± 7.1	16.3 ± 5.9	17.5 ± 5.7
Cereals	12.8 ± 5.1	12 ± 4.1	15.3 ± 5.9	14.6 ± 4.9	15.7 ± 6.1	15.2 ± 5	29.3 ± 9.4	27.8 ± 7.8	30.6 ± 9.5	28.7 ± 8	18.6 ± 7	17.9 ± 6	16.8 ± 6.4	16 ± 5.5	17.7 ± 6.5	16.7 ± 5.5	18.6 ± 6.8	17.6 ± 5.7	8.9 ± 4.3	8.6 ± 3.5
Potatoes	4.2 ± 2.9	4.4 ± 2.8	1.4 ± 1	1.6 ± 1	1.8 ± 1.3	2 ± 1.3	1.8 ± 1.2	2 ± 1.3	1.7 ± 1.2	1.9 ± 1.3	1.4 ± 1	1.7 ± 1.1	1.3 ± 0.9	1.4 ± 0.9	1.6 ± 1.1	1.7 ± 1.1	1.4 ± 0.9	1.5 ± 0.9	1.6 ± 1.1	1.8 ± 1.1
Fruit	3.7 ± 4.2	5.5 ± 4.9	1.5 ± 1.5	2.2 ± 1.9	2.2 ± 2.3	3.1 ± 2.9	1.1 ± 1.2	1.7 ± 1.5	0.9 ± 1	1.4 ± 1.5	1.2 ± 1.3	1.8 ± 1.8	1.2 ± 1.3	1.6 ± 1.7	0.8 ± 1	1.3 ± 1.5	0.8 ± 0.9	1.3 ± 1.4	1 ± 1.1	1.5 ± 1.5
Vegetables	3.5 ± 2.1	4.5 ± 2.2	2.8 ± 1.7	3.6 ± 1.8	2.7 ± 1.8	3.4 ± 1.7	2.3 ± 1.3	3.1 ± 1.5	2.5 ± 1.4	3.3 ± 1.5	2.4 ± 1.5	3.2 ± 1.6	2 ± 1.2	2.5 ± 1.2	2.3 ± 1.3	2.9 ± 1.4	2.2 ± 1.3	2.7 ± 1.3	2.3 ± 1.4	2.9 ± 1.4
Nuts and seeds	0.9 ± 1.7	0.8 ± 1.2	0.7 ± 1.2	0.6 ± 1	1.3 ± 2.5	1.1 ± 1.8	0.9 ± 1.5	0.9 ± 1.4	0.9 ± 1.6	0.9 ± 1.4	0.9 ± 1.8	0.9 ± 1.4	0.7 ± 1.2	0.7 ± 1	0.7 ± 1.2	0.7 ± 1	0.7 ± 1.2	0.7 ± 1	0.4 ± 0.7	0.4 ± 0.6
Legumes	1.4 ± 2.4	1.4 ± 2.5	1 ± 1.7	1 ± 1.8	1.4 ± 2.4	1.5 ± 2.7	0.8 ± 1.3	0.8 ± 1.3	0.9 ± 1.5	0.9 ± 1.6	1.1 ± 1.8	1.1 ± 2	1 ± 1.7	1 ± 1.8	1.1 ± 1.8	1.1 ± 1.9	1.1 ± 1.8	1.1 ± 1.8	1.1 ± 1.8	1.1 ± 2
Other	0.8 ± 1	1 ± 1	0.6 ± 0.8	0.9 ± 0.9	0.7 ± 0.9	0.9 ± 1	0.8 ± 1	1 ± 1.1	0.8 ± 0.9	1 ± 1	0.6 ± 0.8	0.8 ± 0.9	0.7 ± 0.8	0.9 ± 0.9	0.7 ± 0.9	1 ± 1	0.7 ± 0.9	1 ± 1	0.6 ± 0.8	0.8 ± 0.9
Seasonings	0.6 ± 0.6	0.8 ± 1	0.4 ± 0.4	0.6 ± 0.6	0.5 ± 0.4	0.7 ± 0.7	0.5 ± 0.5	0.7 ± 0.7	0.6 ± 0.6	0.8 ± 0.9	0.5 ± 0.5	0.7 ± 0.7	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.5	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.5	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.5	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.6

Table S5 (continued): Animal and plant food groups contributing to protein and amino acid intakes (%)

Nutrient	Methionine		Phenylalanine		Proline		Serine		Threonine		Tryptophan		Tyrosine		Valine		Protein	
	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)	Men (n=717)	Women (n=961)
Animal	80.2 ± 6.7	79.6 ± 6.1	69.2 ± 8.5	68.9 ± 7.8	62.1 ± 9.6	62.8 ± 8.6	70.1 ± 8.1	69.6 ± 7.4	75.8 ± 7.5	74.7 ± 7.1	70.6 ± 8.4	69.8 ± 7.5	75 ± 7.6	74.8 ± 7	73.8 ± 7.5	73.3 ± 6.9	69.2 ± 8.4	68.5 ± 7.7
Meat	48.9 ± 15.1	42.3 ± 12.9	38.4 ± 13.4	32.7 ± 10.9	29 ± 11.5	24.6 ± 8.9	37.6 ± 13.4	31.6 ± 10.7	45.8 ± 14.5	39.1 ± 12.2	38.9 ± 13.8	32.9 ± 11.3	39.8 ± 14	33.8 ± 11.5	40.8 ± 13.9	34.6 ± 11.4	40.6 ± 13.6	34.7 ± 11.2
Red meat	25.5 ± 14.4	22 ± 11.8	18.3 ± 10.7	15.5 ± 8.8	14.1 ± 8.7	12 ± 6.9	18 ± 10.6	15.1 ± 8.5	22.3 ± 12.8	19.1 ± 10.4	16.4 ± 9.9	13.7 ± 8.2	18.8 ± 11.2	15.9 ± 9.1	19.5 ± 11.4	16.5 ± 9.3	19.4 ± 11.2	16.6 ± 9.2
Poultry	12.3 ± 11.7	10.8 ± 9.2	9.9 ± 9.8	8.6 ± 7.5	6.5 ± 6.7	5.6 ± 5.1	9.7 ± 9.6	8.3 ± 7.3	12.1 ± 11.5	10.5 ± 9	11.9 ± 11.5	10.2 ± 8.8	11 ± 10.7	9.5 ± 8.3	10.5 ± 10.4	9 ± 8	10.7 ± 10.4	9.3 ± 8
Game	0.4 ± 2.4	0.2 ± 1.2	0.3 ± 2	0.1 ± 1	0.2 ± 1.3	0.1 ± 0.7	0.3 ± 2	0.1 ± 0.9	0.4 ± 2.5	0.2 ± 1.2	0.4 ± 2.5	0.1 ± 1.1	0.3 ± 2.1	0.1 ± 1.1	0.4 ± 2.3	0.2 ± 1.1	0.4 ± 2.2	0.1 ± 1.1
Offal	1 ± 3.1	1.2 ± 3.1	0.8 ± 2.5	1 ± 2.5	0.6 ± 1.8	0.6 ± 1.6	0.7 ± 2.2	0.8 ± 2.1	0.9 ± 2.6	1 ± 2.5	0.9 ± 2.8	1.1 ± 2.7	0.8 ± 2.3	0.9 ± 2.3	0.8 ± 2.4	0.9 ± 2.4	0.8 ± 2.3	0.8 ± 2.2
Delicatessen	9.7 ± 6.6	8.1 ± 5.5	9 ± 5.8	7.5 ± 4.9	7.6 ± 4.9	6.3 ± 4.1	8.8 ± 5.7	7.3 ± 4.8	10.1 ± 6.7	8.5 ± 5.7	9.3 ± 6.1	7.7 ± 5.1	8.9 ± 5.8	7.5 ± 5	9.7 ± 6.3	8 ± 5.3	9.4 ± 6.1	7.8 ± 5.2
Fish	7.9 ± 8	10.2 ± 8	5.8 ± 6.1	7.5 ± 6	4 ± 4.6	5.1 ± 4.2	6.1 ± 6.6	7.7 ± 6.1	7 ± 7.4	9 ± 7.2	6.4 ± 6.6	8.2 ± 6.5	6.4 ± 6.8	8.2 ± 6.6	6.5 ± 6.9	8.3 ± 6.6	6.3 ± 6.6	8.2 ± 6.4
Dairy products	19.7 ± 9.9	22.4 ± 8.8	21.2 ± 9.8	23.9 ± 8.6	26.3 ± 11.1	29.6 ± 9.7	21.8 ± 10	24.4 ± 8.7	19.6 ± 9.6	22.2 ± 8.3	21.5 ± 9.9	23.9 ± 8.6	25.3 ± 11.5	28.3 ± 10	22.6 ± 10.5	25.5 ± 9.1	19 ± 9.1	21.4 ± 7.9
Milk	5.2 ± 5.9	6.6 ± 5.9	5.6 ± 6.1	7.1 ± 6	6.5 ± 7	8.3 ± 7	6.2 ± 6.7	7.7 ± 6.6	5.3 ± 5.9	6.6 ± 5.7	5.8 ± 6.2	7.2 ± 6	6.3 ± 7.1	8 ± 7.1	6.1 ± 6.7	7.6 ± 6.5	5.2 ± 5.7	6.6 ± 5.6
Yogurts	3.3 ± 4.3	5.1 ± 4.4	3.6 ± 4.5	5.4 ± 4.6	4.3 ± 5.4	6.7 ± 5.7	3.7 ± 4.6	5.6 ± 4.7	3.9 ± 4.8	5.7 ± 4.7	3.2 ± 4.1	4.8 ± 4.1	4.1 ± 5.1	6.2 ± 5.2	3.9 ± 4.9	5.9 ± 5	3.2 ± 4.1	4.9 ± 4.1
Cheese	10.8 ± 7.3	10.2 ± 6.4	11.6 ± 7.5	10.8 ± 6.4	15 ± 9.3	14 ± 8	11.5 ± 7.5	10.6 ± 6.3	10 ± 6.7	9.3 ± 5.7	12 ± 7.8	11.2 ± 6.7	14.5 ± 9.4	13.6 ± 8.1	12.2 ± 7.9	11.4 ± 6.9	10.2 ± 6.6	9.5 ± 5.7
Other	0.4 ± 0.3	0.5 ± 0.4	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.4	0.5 ± 0.5	0.6 ± 0.5	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.4	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.4	0.5 ± 0.6	0.7 ± 0.7	0.5 ± 0.5	0.6 ± 0.5	0.4 ± 0.4	0.6 ± 0.5	0.4 ± 0.3	0.5 ± 0.4
Eggs	3.7 ± 3.1	4.8 ± 3.4	3.7 ± 2.9	4.8 ± 3.1	2.8 ± 2	3.5 ± 2.1	4.7 ± 3.7	6 ± 4	3.4 ± 2.7	4.4 ± 3	3.8 ± 3	4.9 ± 3.2	3.5 ± 2.8	4.5 ± 3.1	3.8 ± 3.1	4.9 ± 3.3	3.3 ± 2.5	4.3 ± 2.7
Plant	19.8 ± 6.7	20.4 ± 6.1	30.8 ± 8.5	31.1 ± 7.8	37.9 ± 9.6	37.2 ± 8.6	29.9 ± 8.1	30.4 ± 7.4	24.2 ± 7.5	25.3 ± 7.1	29.4 ± 8.4	30.2 ± 7.5	25 ± 7.6	25.2 ± 7	26.2 ± 7.5	26.7 ± 6.9	30.8 ± 8.4	31.5 ± 7.7
Cereals	14.3 ± 5.7	13.7 ± 4.8	22.5 ± 7.7	21.2 ± 6.5	30.8 ± 9.5	28.4 ± 8.1	21 ± 7.2	19.8 ± 6.1	16 ± 6.1	15.2 ± 5.1	21.1 ± 7.4	19.8 ± 6.2	17.7 ± 6.6	16.5 ± 5.6	17.9 ± 6.4	16.8 ± 5.4	21.5 ± 7.4	20.2 ± 6.3
Potatoes	1.2 ± 0.9	1.4 ± 0.9	1.7 ± 1.2	1.9 ± 1.2	1 ± 0.7	1.1 ± 0.7	1.6 ± 1.1	1.7 ± 1.1	1.7 ± 1.2	1.9 ± 1.2	1.7 ± 1.2	1.9 ± 1.3	1.7 ± 1.2	1.8 ± 1.2	1.9 ± 1.3	2.1 ± 1.3	1.8 ± 1.2	1.9 ± 1.2
Fruit	0.6 ± 0.7	0.9 ± 1	1 ± 1.1	1.5 ± 1.6	1.7 ± 1.7	2.4 ± 2.1	1.4 ± 1.4	2 ± 1.9	1 ± 1.1	1.5 ± 1.6	1 ± 1.3	1.7 ± 2.1	0.6 ± 0.9	1 ± 1.4	1 ± 1.1	1.6 ± 1.5	1.6 ± 1.4	2.2 ± 1.9
Vegetables	1.7 ± 1.1	2.2 ± 1	2.3 ± 1.4	2.9 ± 1.4	1.8 ± 1.1	2.2 ± 1.1	2.5 ± 1.4	3.1 ± 1.5	2.6 ± 1.5	3.3 ± 1.6	2.5 ± 1.5	3.4 ± 1.7	2 ± 1.2	2.6 ± 1.3	2.4 ± 1.4	3 ± 1.5	2.4 ± 1.4	3.1 ± 1.5
Nuts and seeds	0.5 ± 0.8	0.5 ± 0.7	0.8 ± 1.5	0.8 ± 1.2	0.6 ± 1.1	0.7 ± 1.2	0.8 ± 1.4	0.8 ± 1.2	0.7 ± 1.2	0.7 ± 1	0.8 ± 1.3	0.8 ± 1.1	0.7 ± 1.3	0.7 ± 1	0.7 ± 1.2	0.7 ± 1	0.8 ± 1.5	0.8 ± 1.2
Legumes	0.5 ± 0.8	0.5 ± 0.9	1.2 ± 2.1	1.2 ± 2.1	0.8 ± 1.3	0.8 ± 1.4	1.3 ± 2.1	1.2 ± 2.1	1.2 ± 1.9	1.2 ± 2	0.9 ± 1.4	0.8 ± 1.5	1.1 ± 1.9	1.1 ± 1.9	1.1 ± 1.8	1.1 ± 1.8	1 ± 1.7	1.1 ± 1.9
Other	0.6 ± 0.8	0.8 ± 0.9	0.8 ± 1	1 ± 1.1	0.8 ± 1	1 ± 1	0.9 ± 1	1.1 ± 1.1	0.7 ± 0.9	1 ± 1	0.9 ± 1.1	1.2 ± 1.2	0.7 ± 0.9	0.9 ± 0.9	0.8 ± 1	1 ± 1.1	1.2 ± 1	1.5 ± 1.1
Seasonings	0.4 ± 0.3	0.5 ± 0.4	0.4 ± 0.4	0.6 ± 0.5	0.5 ± 0.4	0.6 ± 0.5	0.5 ± 0.4	0.6 ± 0.5	0.4 ± 0.4	0.6 ± 0.6	0.5 ± 0.4	0.6 ± 0.6	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.5	0.4 ± 0.4	0.5 ± 0.5	0.5 ± 0.4	0.6 ± 0.7

Supplemental references

1. Suga H, Murakami K, Sasaki S. Development of an amino acid composition database and estimation of amino acid intake in Japanese adults. *Asia Pacific journal of clinical nutrition* 2013;22(2):188-99.
2. Centre d'Information des Viandes & INRA. Internet: <http://www.lessentiellesviandes-pro.org/pdf/PDF-tous%20morceaux.pdf> (accessed 08/03/2017).
3. U.S. Department of Agriculture ARS. USDA Branded Food Products Database . Nutrient Data Laboratory Home Page, <http://ndb.nal.usda.gov>. 2016.
4. Subdivision on Resources, Council for Science and Technology, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT). Standard Tables of Food Composition in Japan - 2015 - (Seventh Revised Edition). 2015.
5. Health Canada. Canadian Nutrient File - <http://www.hc-sc.gc.ca/fn-an/nutrition/fiche-nutri-data/index-eng.php>. 2015.
6. The New Zealand Institute for Plant & Food Research Limited. New Zealand Food Composition Database: New Zealand FOODfiles 2014 Version 01. Retrieved October 30, 2016 from <http://www.foodcomposition.co.nz/foodfiles>. 2015.
7. FAO/INFOODS. Guidelines for Checking Food Composition Data prior to the Publication of a User Table/Database-Version 1.0. 2012.
8. Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition (2002 : Geneva S. Protein and amino acid requirements in human nutrition : report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation. World Health Organization, WHO Technical Report Series 2007;935:256.
9. Martin A, Touvier M, Volatier J-L. The Basis for Setting the Upper Range of Adequate Intake for Regulation of Macronutrient Intakes, Especially Amino Acids. *The Journal of Nutrition* 2004;134(6):1625S-9S.
10. Trumbo P, Schlicker S, Yates AA, Poos M. Dietary Reference Intakes for Energy, Carbohydrate, Fiber, Fat, Fatty Acids, Cholesterol, Protein and Amino Acids. *Journal of the American Dietetic Association* 2002;102(11):1621-30.

2.2. Travail personnel n°2 : Les profils de consommation protéique sont associés à l'adéquation nutritionnelle dans la population générale adulte française

Résumé

Contexte : L'apport en protéines semble partiellement structurer les habitudes alimentaires, car la plupart des régimes alimentaires émergents actuels (e.g. végétariens et flexitariens) peuvent être décrits en fonction de leurs niveaux de consommation de sources de protéines spécifiques. Toutefois, peu de données sont disponibles sur les profils de consommation protéique dans la population générale et leur association avec l'adéquation nutritionnelle.

Objectifs : Identifier des profils de consommation protéique dans la population française et évaluer si ces profils diffèrent en termes d'adéquation nutritionnelle.

Méthode : En nous basant sur les données d'apports en protéines alimentaires de 1 678 adultes d'une enquête nationale représentative sur l'alimentation en France et sur des méthodes de factorisation de matrices non-négatives, suivie de classification ascendante hiérarchique, nous avons pu identifier des profils de consommation protéique distincts et comparer leur adéquation nutritionnelle (en utilisant le score probabiliste PANDiet).

Résultats : Nous avons identifié huit profils de consommation protéique qui discriminaient les individus selon leurs apports protéiques et étaient caractérisés par l'apport d'un ou de plusieurs aliments protéiques spécifiques : les plats préparés à base de viande, la volaille, le porc, les aliments traditionnels, le lait, les aliments à emporter, le bœuf et le poisson. Les « consommateurs de poisson » et les « consommateurs de lait » présentaient une meilleure adéquation nutritionnelle globale, tandis les « consommateurs de porc » et les « consommateurs d'aliments à emporter » présentaient une adéquation nutritionnelle plus faible que la moyenne de la population. L'adéquation nutritionnelle pouvait fréquemment s'expliquer par les caractéristiques des aliments fortement contributeurs à l'apport protéique : par exemple, les « mangeurs de viande » avaient des probabilités d'adéquation élevées concernant le fer et le zinc.

Conclusion : Les profils de consommation protéique semblent constituer des éléments forts de la structure sous-jacente des régimes alimentaires et sont associés à l'adéquation nutritionnelle globale.

Valorisation : Ce travail a été publié dans la revue *Nutrients* (Volume 10, n°2) le 17 février 2018.

Messages-clés

- Des profils de consommation protéique ont été identifiés dans la population française, et sont associés à une forte consommation d'un ou plusieurs groupes d'aliments protéiques (le plus souvent animaux).
- L'adéquation nutritionnelle diffère selon les profils de consommation identifiés : les consommateurs de poisson et les consommateurs de lait ont une meilleure adéquation nutritionnelle que la moyenne de la population et les consommateurs de porc et d'aliments à emporter ont une moins bonne adéquation nutritionnelle que la moyenne.
- Les probabilités d'adéquation des nutriments diffèrent largement selon les profils et sont le plus souvent liées aux aliments spécifiques consommés dans les profils.
- La consommation de sources de protéines semble refléter la structure sous-jacente des régimes alimentaires.

Article

Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population

Erwan de Gavelle, Jean-François Huneau and François Mariotti * 

UMR PNCA, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France;
erwan.degavelle@agroparistech.fr (E.d.G.); jean_francois.huneau@agroparistech.fr (J.-F.H.)

* Correspondence: francois.mariotti@agroparistech.fr

Received: 12 January 2018; Accepted: 14 February 2018; Published: 17 February 2018

Abstract: Protein food intake appears to partially structure dietary patterns, as most current emergent diets (e.g., vegetarian and flexitarian) can be described according to their levels of specific protein sources. However, few data are available on dietary protein patterns in the general population and their association with nutrient adequacy. Based on protein food intake data concerning 1678 adults from a representative French national dietary survey, and non-negative-matrix factorization followed by cluster analysis, we were able to identify distinctive dietary protein patterns and compare their nutrient adequacy (using PANDiet probabilistic scoring). The findings revealed eight patterns that clearly discriminate protein intakes and were characterized by the intakes of one or more specific protein foods: ‘Processed meat’, ‘Poultry’, ‘Pork’, ‘Traditional’, ‘Milk’, ‘Take-away’, ‘Beef’ and ‘Fish’. ‘Fish eaters’ and ‘Milk drinkers’ had the highest overall nutrient adequacy, whereas that of ‘Pork’ and ‘Take-away eaters’ was the lowest. Nutrient adequacy could often be accounted for by the characteristics of the food contributing to protein intake: ‘Meat eaters’ had high probability of adequacy for iron and zinc, for example. We concluded that protein patterns constitute strong elements in the background structure of the dietary intake and are associated with the nutrient profile that they convey.

Keywords: dietary protein pattern; nutrient adequacy; dietary diversity; protein diets

1. Introduction

The importance of different protein sources in human nutrition has seen a renewal of interest because of sustainability issues that must be addressed in the near future [1]. In western countries, the subject has become highly topical since the development of various new dietary protein patterns in recent years, such as vegan, vegetarian and flexitarian diets [2,3]. Such patterns have been widely studied in specific populations for their association with the nutritional quality of diets [2,4,5] or mortality and morbidity [6–8]. However, very little is known about the profiles of protein intakes and the nutritional quality of diets in a more general, omnivorous population.

The potential contribution of protein sources to nutrient adequacy is usually inferred from the nutrient profiles of different protein sources in terms of their differences and complementarity. As regards protein per se, animal foods are known to have higher protein:energy ratios and slightly better protein and amino acid digestibility than plant-based foods [9,10]. However, the differences between the nutrient profiles of protein sources are not limited to protein and amino acid intakes. Indeed, meat contributes more to zinc, vitamin B-12, phosphorus and iron intakes than plant-based products, whereas the latter are higher contributors of fiber, vitamin E or magnesium [11]. Accordingly, consuming a variety of protein food sources (meat, dairy products, fish, cereals, legumes) is advocated to ensure adequate nutrient intakes, as recommended by national guidelines [12,13].

However, protein sources cannot be studied as if they are simply added together, because they form part of complex diets. The intake of each protein food group is associated with that of other food groups, but this complexity can be described using the dietary patterns approach. Dietary patterns based on the overall food intake have been widely studied during the past decade relative to health outcomes or the quality or diversity of diets [14,15]. These studies have often identified three to six dietary patterns from population food intakes, such as the Mediterranean, 'Prudent', 'Nordic' or 'Western' patterns [14,16]. In most cases, these patterns are identified using individual overall food group intakes in order to describe and summarize the highest number of food factors.

However, few studies have adopted the same approach to analyze protein food intakes and reduce the multidimensionality of protein intake to a limited number of protein food profiles [17,18]. These studies identified five to six clusters based on their protein profiles and assessed the link between these profiles and health parameters, but they did not study associations with the nutritional quality of different diets.

Our aim was to identify and analyze food protein profiles in a general western population and study their associations with the nutrient adequacy and diversity of the diet.

2. Materials and Methods

2.1. Population and Food Data

The population studied was derived from that covered by the second individual and national food consumption survey (INCA2) performed in 2006–2007, as previously described [19]. Briefly, we excluded adults over 65 years old (whose nutrient requirements differed from those of younger adults) and under- and over-reporters, which led to a final sample containing 1678 adults (717 men and 961 women). Food intakes were derived from 7-day food records, and individual characteristics from self-reported and face-to-face questionnaires, as described by Dubuisson et al. [20].

2.2. Nutrient Composition of Foods

Data on the nutrient composition of the INCA2 foods were extracted from the 2016 CIQUAL (Centre d'Information sur la Qualité des Aliments—Centre for Information on Food Quality) database, with the following modifications. Niacin equivalent was calculated as the sum of preformed niacin and 1/60 tryptophan, which was extracted from the amino acid database described in detail elsewhere [19]. The phytate composition was derived from and adapted to French foods from the phytate content of British foods table developed by Amirabdollahian et al. [21]. Percentages of heme and non-heme iron in animal foods were obtained using reports from the French Information Centre on Meat [22,23] and other published analyses [24]. The estimated bioavailability of protein, zinc and iron was taken into account given the differences between animal and plant sources, as described previously for protein [19], iron [25,26] and zinc [27]. The complete method implement is described in Methods S1.

2.3. Identification of Dietary Patterns

Dietary patterns were identified based on the intakes of "protein" food groups. INCA2 food items were classified as "protein foods" if they met two criteria: (1) the percentage energy from protein was >10%, which refers to their intrinsic protein content, (2) the level of intake at the 90th percentile was >5 g protein, which refers to their potential contribution to protein intake at a relatively high level.

"Protein" food groups were selected from the 123 INCA2 food sub-groups which complied with two criteria: (1) >25% of the food items in the sub-group were "protein" food items as previously defined, and (2) the food groups were consumed by >10% of the population, in order to avoid an excessive number of "zeros" in the data which might lead to irrelevant results, and as applied during previous studies [16,28]. The groups were redefined to aggregate certain foods with a similar composition and usual time of consumption (e.g., "ripened cheese" and "non-ripened cheese" into "cheese"), or extract food sub-groups described in the recently updated French National Nutrition and

Health Program (PNNS) nomenclature [12] (e.g., “lean fish” and “fatty fish” from “fish”). Forty-three protein groups were finally selected to identify dietary protein patterns (Table 1).

Table 1. Protein food sub-groups selected to identify dietary protein patterns and number of protein foods in each sub-group.

Plant Protein Sub-Groups		Animal Protein Sub-Groups		Composite Protein Subgroups	
Protein Sub-Groups	No. of Protein Food	Protein Sub-Groups	No. of Protein Food	Protein Sub-Groups	No. of Protein Food
Bread	13	Beef	16	Pizza	8
Crispbread	2	Pork	5	Quiche	5
Wholemeal bread or crispbread	2	Veal	6	Pastry rolls	4
Pastas	3	Lamb	4	Burgers	4
Cooked wheat	2	Poultry	18	Sandwiches	17
Beans and peas	2	Offal	15	Other sandwiches	8
Legumes	8	Ham	16	Soups	6
Seeds and nuts	6	Sausage	24	Meat dishes	18
		Pâté	11	Pasta or potato dishes	11
		Lean fish	31	Pancakes	13
		Fatty fish	30	Dishes without filling	14
		Fish derivatives	9	Vegetables dishes	5
		Shellfish	16	Mixed salads	5
		Milk	8	Custards	5
		Cocoa beverages	3	Desserts	8
		Sweetened yogurts	14		
		Natural yogurts	7		
		Cream cheese	15		
		Cheese	90		
		Eggs	11		

The non-negative matrix factorization (NMF) method was applied to the percentage contribution of each sub-group to protein intake. The NMF method was designed to summarize information on the 43 protein sub-groups in a limited number of factors representing combinations of protein subgroups eaten by similar individuals. We chose to use the term “factor” rather than “consumption systems” which had previously been applied in several studies with a similar NMF method [16,29,30] as the term “consumption system” could be understood as being related to food origin, cooking method or consumption location. The “loadings” of the protein food subgroups on the factors were the weight, or the contribution, of each protein subgroup on the factor. The Brunet algorithm [31] was implemented, choosing the number of factors from graphical analyses [16,29] and taking account of the interpretability of the results. Finally, a hierarchical cluster analysis was performed on the score achieved for the eight factors by each individual. The number of clusters chosen was based on both the elbow and silhouette [32] methods.

2.4. Nutrient Adequacy of the Diet

The nutrient adequacy of the diet was assessed using the PANDiet score [33,34], which was updated to account for the 2016 Anses guidelines [35] (Figure 1).

As in previous versions of the PANDiet score, the Adequacy Subscore (AS) was calculated as the average probability of adequacy of nutrients for which the usual intake should be above a reference value, multiplied by 100.

PANDiet score			
Average of Adequacy and Moderation subscores			
Adequacy subscore			
Nutrient	Reference value (/day)	Variability	Source
Protein	0.66 g/kg bw	12.5%	[36]
Total fat	30% EIEA	15%	[37]
LA	3.08% EIEA	15%	[37]
ALA	0.769% EIEA	15%	[37]
DHA	0.192 g	15%	[37]
EPA + DHA	0.385 g	15%	[37]
Fiber	23 g	15%	[35]
Vitamin A	570 or 490 µg	15%	[35]
Thiamin	0.3 mg/1000 kcal	20%	[38]
Riboflavin	0.55 mg/1000 kcal	15%	[35]
Niacin	5.44 mg NE/1000kcal	10%	[35]
Panthenic acid	3.62 or 2.94 mg	30%	[35]
Vitamin B6	1.5 or 1.3 mg	10%	[39]
Folate	250 µg	15%	[35]
Vitamin B12	3.33 µg	10%	[35]
Vitamin C	90 mg	10%	[35]
Vitamin D	10 µg	25%	[35]
Vitamin E	5.8 or 5.5 mg	40%	[35]
Calcium	860 (<= 24 y.o) or 750 (>24 y.o.)	15% or 13%	[35]
Copper	1.0 or 0.8 mg	15%	[35]
Iodine	107 µg	20%	[35]
Bioavailable iron	c.f. iron section	c.f.iron section	[35]
Magnesium	5 mg/kg bw	15%	[35]
Manganese	1.56 or 1.39 mg	40%	[35]
Phosphorus	Calcium (mol) / 1.65 c.f. phosphorus section	7.5% + CV Calcium (mg)	[40]
Potassium	Sodium (mol) / 1.3 c.f. potassium section	15% + CV Sodium (mg)	[35]
Selenium	54 µg	15%	[35]
Bioavailable zinc	0.642 + 0.038 b.w.	15%	[35]
Moderation subscore			
Nutrient	Reference value (/day)	Variability	Source
Protein	2.2 g/kg bw	12.5%	[35]
Total fat	40% EIEA	15%	[35]
SFA	12% EIEA	15%	[37]
Cholesterol	300 mg	15%	[13]
Sugars	100 g	15%	[35]
Sodium	3312 or 2483 mg	30%	[35]
Tolerable Upper Intake Limits		Source	
Vitamin A	3000 µg	[35]	
Niacin	900 mg	[35]	
Vitamin B6	25 mg	[35]	
Folate	1170 µg c.f. Folate section	[35]	
Vitamin D	100 µg	[35]	
Vitamin E	300 mg	[35]	
Calcium	2500 mg	[35]	
Copper	10 mg	[35]	
Iodine	600 µg	[35]	
Dissociable magnesium	250 mg	[35]	
Selenium	300 µg	[35]	
Zinc	25 mg	[35]	

Figure 1. The PANDiet score, expressed as the average of an adequacy subscore (accounting for 28 nutrients), and a moderation subscore (accounting for six nutrients, plus 12 potential penalty values). DHA and EPA + DHA are weighted by $\frac{1}{2}$ as DHA is counted twice. Niacin equivalents were calculated as the sum of dietary niacin and $\frac{1}{60}$ dietary tryptophan. The upper reference value for sugars excludes lactose. The tolerable upper intake limit for vitamin A concerns retinol only. ALA, Alpha Linolenic Acid. DHA, Docosahexaenoic Acid. EIEA, Energy Intake Excluding Alcohol. EPA, Eicosapentaenoic acid. LA, Linoleic Acid. NA, Niacin Equivalent. SFA, Saturated Fatty Acid.

For a given nutrient, the probability of adequacy was determined from the estimated average requirement (EAR) and its variability. Regarding nutrients for which no EAR was defined but an Adequate Intake (AI) had been determined, we used a pseudo-EAR calculated as follows: pseudo-EAR = AI / (1 + 2.CV), where CV is the Coefficient of Variation for the requirement, which in the absence of a specific estimated value was fixed at 15%. When the AI values were derived from the mean intake of the population, the CVs of intakes by the population were used. For iron and zinc, physiological requirements (i.e., the requirements for absorbed iron and zinc) were used because the bioavailability of these nutrients was calculated. Indeed, EARs reflect the requirements for nutrient intakes, and already account for average bioavailability. When nutrient intakes are corrected with respect to bioavailability, they must be compared with physiological requirements. For potassium and phosphorus, the requirements were dependent on their molar ratios to sodium and calcium,

respectively. Thus the requirements were defined as a function of sodium and calcium molar intakes. As for iron, and the case of menstruating women, the requirements were not normally distributed so a log-normal distribution was applied.

As in the previous version, the Moderation Subscore (MS) was calculated as the average probabilities of inadequacy of six nutrients for which an upper bound reference value exists, together with penalty values. For the six nutrients, the probability of adequacy was calculated as before, using the upper bound of the acceptable macronutrient distribution range. When no variability was specified, a value of 15% was applied. Because the reference value for sodium was the median of intake by the population, the variability of intake was used. For other vitamins and minerals with a low risk of excessive intake, a penalty value was applied: a value of 0 was added when the average intake exceeded the upper tolerable limit.

The full method is described in Methods S2. Verifications were made that the updated PANDiet score had passed the initial scheme for construct validity, as for the original version [33]. A low association with energy ($r = -0.16$; $p < 0.0001$), and a significant association with age, gender, energy density ($p < 0.0001$) and smoking status ($p < 0.01$) were found.

2.5. Diversity of the Protein Intake

A protein food diversity score (ProtDiv-S) derived from the DivS-score developed by Bianchi, Egnell et al. [41] was designed using the 43 protein groups described previously. The foods in 16 groups were composite foods, and were broken down into ingredients as described in a previous work [42]. These ingredients and the 27 other groups were allocated to the five protein groups ("Fruit and vegetables", "Starch", "Legumes", "Meat and delicatessen, fishery products and eggs" and "Milk and dairy products") and to the 17 protein subgroups described in the PNNS nomenclature [12]. The score was then calculated as follows:

$$ProtDiv - S = \frac{1}{5} \times \sum_{i=1}^5 \frac{\text{Number of subgroups consumed in food group } i}{\text{Total number of subgroups in food group } i} \times 100$$

2.6. Characterization of Dietary Patterns

The single association between possible determinants of dietary patterns and these patterns was tested under univariate analysis in order to select the relevant characteristics that should be included in logistic regression models. The variables selected were gender, age, level of education, size of town localization of the household and occupational level. After this analysis, the determinants considered were analyzed independently of the others for each dietary pattern using logistic regression models by comparison with the overall population.

The association between probabilities of adequacy for each nutrient, AS, MS, PANDiet, ProtDiv-S and dietary patterns was assessed using ANOVA, and the difference between mean probabilities of adequacy in patterns and the overall population was assessed using ANOVA adjusted for gender.

The Brunet algorithm was implemented using the 'NMF' R package [43]. All other statistical analyses were performed using SAS 9.1.3.

3. Results

3.1. Identification of Dietary Protein Patterns

A total of eight factors were identified as summarizing the protein food intake of the population using the NMF method (Table 2). Four factors concerned one major food group which contributed more than 50% to the factor (respectively poultry, pork, beef and milk), while the four others were defined by several food groups contributing less than 50%. Pearson's correlation coefficient values were low between the different factors (≤ 0.34), indicating that the protein intake patterns identified were independent.

Table 2. Factors identified applying the NMF method to the INCA2 study data ($n = 1678$) and loadings of protein food subgroups (%) on the factors.

Processed Meat		Poultry		Pork		Traditional	
Protein Food Subgroup	Loading (%)	Protein Food Subgroup	Loading (%)	Protein Food Subgroup	Loading (%)	Protein Food Subgroup	Loading (%)
Meat dishes ¹	38.2	Poultry	83.8	Pork	62.1	Cheese	26.1
Lamb	13.2	Bread	4.6	Bread	11.0	Bread	25.1
Bread	12.8	Yogurts	3.0	Sausage	7.3	Fatty fish	9.3
Offal	10.3			Ham	3.1	Ham	7.3
Sausages	6.9			Pâté	2.9	Eggs	4.9
Cheese	6.9			Pasta	2.7	Sausage	4.7
						Natural yogurts	4.0
						Cream cheese	2.6
Milk		Take-Away		Beef		Fish	
Protein Food Subgroup	Loading (%)	Protein Food Subgroup	Loading (%)	Protein Food Subgroup	Loading (%)	Protein Food Subgroup	Loading (%)
Milk	64.7	Pizza	23.2	Beef	69.1	Lean fish	38.6
Cocoa beverages	8.5	Other sandwiches	10.9	Bread	9.6	Veal	17.6
Yogurts	2.9	Burgers	10.7	Pasta	4.5	Wholemeal bread	8.6
Pasta dishes	2.9	Mixed salads	9.4	Ham	4.3	Natural yogurts	5.3
Cream cheese	2.7	Sandwiches	8.7	Sausages	3.3	Yogurts	4.0
		Pasta dishes	7.1	Yogurts	3.2	Cream cheese	3.3
		Cheese	5.2			Soups	2.7
		Pancakes	4.2				
		Pasta	3.1				
		Sausages	2.9				

¹ Loading of protein food subgroup on the factor $\geq 2.5\%$.

After hierarchical cluster analysis, eight different dietary patterns were identified based on the scores of individuals for each factor. Each pattern was described by only one major factor, significantly more used in the pattern than in the overall population. The four patterns described by factors with one major contributor were identified as ‘Poultry eaters’ (9% of the population), ‘Pork eaters’ (14%), ‘Beef eaters’ (15%) and ‘Milk drinkers’ (14%). The other four were identified as ‘Processed meat eaters’, ‘Traditional eaters’, ‘Take-away eaters’ and ‘Fish eaters’ (Table 3). The “Processed meat eaters” pattern accounted for 11% of the population and concerned consumers who used the ‘Processed meat’ factor significantly more than the overall population. This factor was represented by meat dishes (e.g., paella, cassoulet or chili con carne), lamb, bread, offal, and sausages. ‘Traditional eaters’ accounted for 21% of the population and were described by the traditional factor, explained mainly by cheese, bread, fatty fish, delicatessen and eggs. The ‘Take-away eaters’ (10% of the population) used the take-away factor more than the overall population, and this was mainly characterized by take-away products such as pizza, burger, sandwiches or pancakes, and processed foods such as mixed salads and pasta dishes. Finally, ‘Fish eaters’ accounted for 6% of the population and were characterized by the ‘Fish eaters’ factor associated with fish, veal, wholemeal products, yogurts, cream cheese and soups.

Table 3. Dietary protein patterns identified from the scores of individuals from the INCA2 study ($n = 1678$) for the different factors.

Dietary Protein Pattern ¹	No. of Individuals in the Pattern	Factors Contributing to the Pattern ²	% Contribution of the Factor
Processed meat eaters	192	Processed meat	36
Poultry eaters	144	Poultry	44
Pork eaters	239	Pork	36
Traditional eaters	347	Traditional	38
Milk drinkers	241	Milk	28
Take-away eaters	172	Take-away	37
Beef eaters	244	Beef	37
Fish eaters	99	Fish	36

¹ Patterns identified from hierarchical cluster analysis on the scores of each individual for the eight factors. Each pattern was described by only one major factor, used significantly more in the pattern than in the overall population. ² These factors contributed significantly more to the pattern than to the overall population.

As could be expected from the different factors, meat (without poultry) contributed more to protein intake than the overall sample in 'Pork eaters' and 'Beef eaters' (more than 25%), and less in 'Poultry eaters', 'Traditional eaters', 'Milk drinkers' and 'Fish eaters' (less than 15%; Figure 2 and Table S3). Likewise, in 'Poultry eaters', poultry contributed more than the overall population to protein intake (27%). Delicatessen was a high contributor to protein intake among 'Pork eaters' and 'Traditional eaters' (9%), whereas it was a low contributor for 'Poultry eaters' and 'Fish eaters' (respectively 8% and 6%). The contribution of fish to protein intake was higher among 'Traditional eaters' and 'Fish eaters' than in the overall population (respectively 10% and 15%), as was that of yogurt (6% and 5%, respectively). 'Milk drinkers' saw the highest contribution to protein intake for milk (15%). Cheese, eggs and cereals contributed more to protein intake among 'Traditional eaters' and 'Take-away eaters' while nuts and seeds contributed more to protein intake in 'Traditional eaters' (1%) and legumes in 'Processed meat eaters' (2%). 'Traditional eaters', 'Take-away eaters' and 'Fish eaters' where the patterns displayed a significantly higher percentage (~35%) of plant protein (as determined after breaking down composite dishes into ingredients), whereas poultry, pork and milk eaters had a lower percentage (~28%).

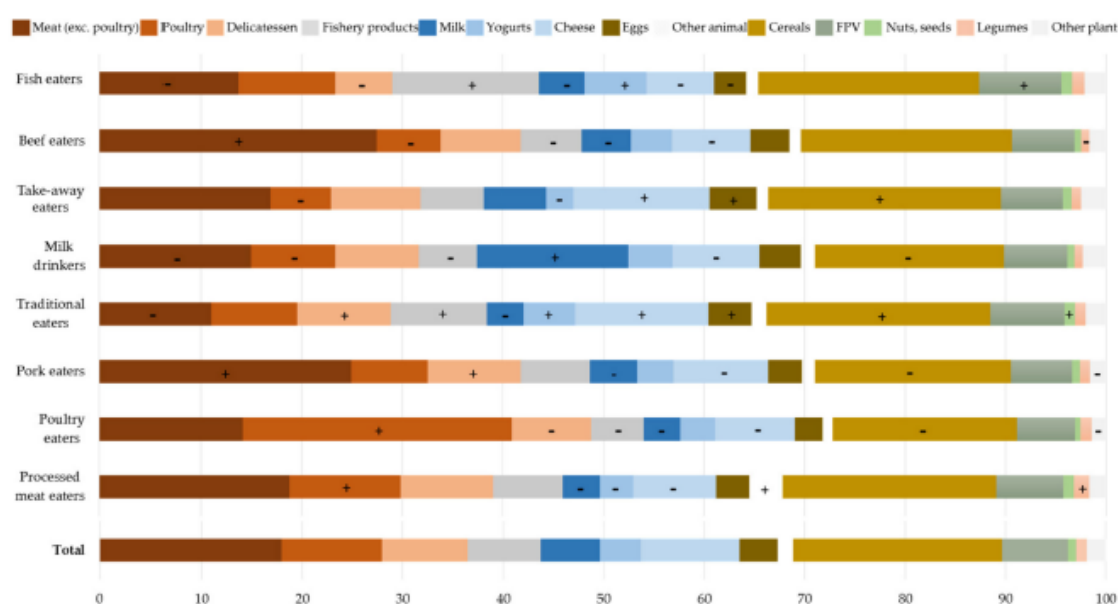


Figure 2. Food groups contributing to protein intake (%) in the eight clusters identified by the study. “+” means significantly superior to the mean of the overall population ($p < 0.05$) and “-” means significantly inferior to the mean of the overall population ($p < 0.05$). FPV: fruit, potatoes and vegetables.

3.2. Characterization of Dietary Protein Patterns

The OR estimates and 95% CI values from logistic regression analyses are presented in detail in Table S1. ‘Milk drinkers’ were more likely to be women ($p < 0.05$) whereas ‘Poultry eaters’ and ‘Beef eaters’ were more likely to be men ($p < 0.05$). ‘Traditional eaters’ were more likely to be older than 50 years old than younger than 24 years old ($p < 0.0001$), which contrasted with ‘Take-away eaters’ who were more likely to be under 24 than over 50 ($p < 0.0001$). ‘Traditional eaters’ tended to be more highly educated than poorly educated ($p < 0.05$). Finally, ‘Processed meat eaters’ were more likely to live in the suburbs than in dispersed areas ($p < 0.05$) and ‘Fish eaters’ were more likely to live in villages than in dispersed areas ($p < 0.05$).

Probabilities of adequacy, PANDiet and ProtDiv-S scores for the different dietary patterns are presented in Table S2. ‘Fish eaters’ and ‘Milk eaters’ had significantly higher PANDiet scores (respectively 61.8 and 58.9) than the overall population, while those of ‘Take-away eaters’ and ‘Pork eaters’ were significantly lower (respectively 53.7 and 56.5). The AS was higher for ‘Traditional eaters’

(65.9), 'Milk drinkers' (67.3) and 'Fish eaters' (68.0), and lower for 'Take-away eaters' (58.3). The MS score was higher among 'Beef eaters' (53.1) and 'Fish eaters' (55.6) (Figure 3).

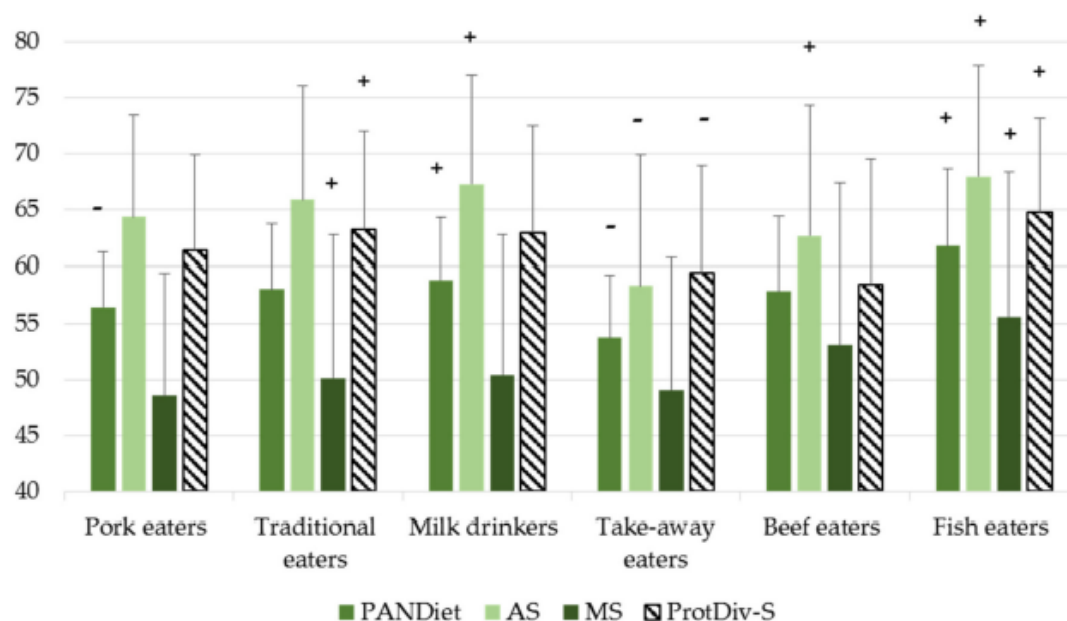


Figure 3. PANDiet, AS, MS and ProtDiv-S of protein dietary patterns in INCA2 study ($n = 1678$). Only those patterns which differed significantly from those of the general population for at least one parameter are shown. Significant differences are represented with a "+" if the parameter in the cluster was higher than in the overall population, and a "-" if the parameter in the cluster was lower. AS, Adequacy Subscore. MS, Moderation Subscore. ProtDiv-S, Protein Diversity Score.

The PA values for fiber, EPA + DHA and DHA were higher than in the overall population among 'Fish eaters' and 'Traditional eaters', as was the PA for ALA in 'Fish eaters'. 'Take-away eaters' had lower PA values for all these nutrients and LA, and 'Milk drinkers' had a lower probability of adequacy for DHA. (Figure 4). 'Milk drinkers' had higher PA values than the overall population for vitamins B1, B2, B5, B9, B12, and C, and 'Fish eaters' and 'Traditional eaters' had higher PA values for vitamins B9, E, and C ('Fish eaters' only). 'Fish eaters' had higher PA values than the overall population for iodine, magnesium, potassium, selenium, manganese and copper, but a lower PA for zinc. 'Beef eaters' had higher PA values for zinc and iron, but lower values for iodine and calcium. 'Traditional eaters' had higher PA values for copper, manganese and calcium, but lower values for iron, zinc and potassium. 'Milk drinkers' had higher PA values for iodine, potassium and calcium, but lower values for manganese. 'Take-away eaters' had lower PA values for all vitamins and minerals except from zinc, phosphorus and vitamin B3. 'Fish eaters' had higher PA values for SFA, cholesterol and sodium. 'Milk drinkers' had a lower PA value for SFA, 'Poultry eaters' for cholesterol and 'Traditional eaters' for sodium.

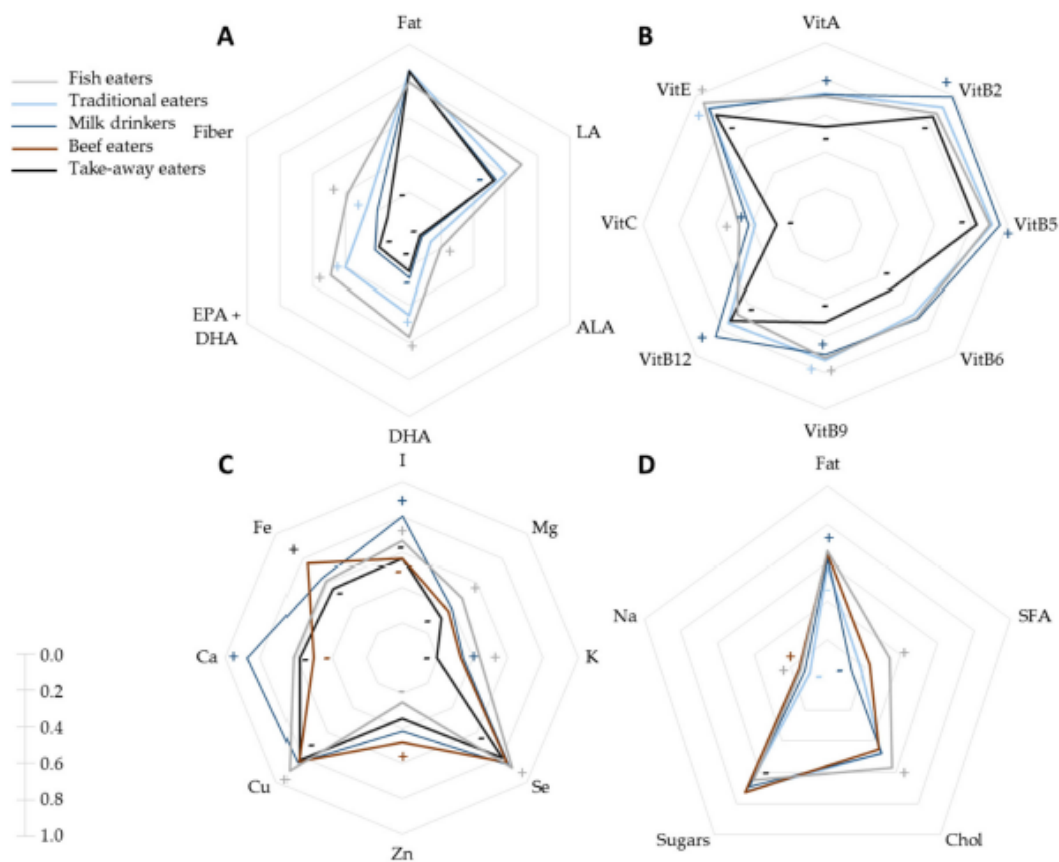


Figure 4. Probabilities of adequacy (PA) for nutrients in the PANDiet score. Only nutrients with a significant association between dietary patterns and PA values, and PA < 0.95 for all patterns, are shown. Significant differences between the PA of a cluster and the PA of the overall sample are represented with a "+" if the PA of the cluster is higher, and a "-" if the PA of the cluster is lower. The four patterns with the highest number of significant differences are shown in each diagram. A: AS macronutrients. B: AS vitamins. C: AS minerals. D: MS nutrients. ALA, Alpha Linolenic Acid. Chol, Cholesterol. DHA, Docosahexaenoic Acid. EPA, Eicosapentaenoic acid. LA, Linoleic Acid. SFA, Saturated Fatty Acid. Sugars, Sugars (except lactose). Vit, Vitamin.

Finally, dietary protein patterns displayed varied degrees of diversity of protein foods: healthy and 'Traditional eaters' had a higher ProtDiv-S score than the overall population (respectively 70.1 and 71.4) whereas 'Take-away eaters' and 'Beef eaters' had lower scores (respectively 63.7 and 63.9).

4. Discussion

During this study we showed that the general adult population can be clearly discriminated in terms of its protein intake profile. The eight dietary protein patterns are very easy to interpret and have different nutritional characteristics, as shown by the probabilities of adequacy of each nutrient intake (PA), overall nutrient adequacy (PANDiet score) and protein source diversity. The most important contrasts regarding the PANDiet score and protein diversity were found between the 'Fish eaters' pattern and the 'Take-away eaters' pattern. Whereas the overall nutrient adequacy of the diets of other protein patterns were similar, there were differences in the adequacy of intake of many individual nutrients, showing that these protein patterns, which are significant in the underlying structure of the diet, are associated with specific clusters of nutrient intake.

4.1. Identification of Dietary Protein Patterns

Dietary protein patterns were identified using the NMF method and not standard methods such as Principal Component Analysis, Factor Analysis or clustering (Hierarchical Cluster Analysis, k-means) [15,44]. We made this choice because these latter methods have limitations when applied to food intake data because of the significant number of zeros and non-negative data, as acknowledged in recent publications on identifying food patterns [16,29,30]. As no consensus has been reached regarding the choice of algorithm to use when identifying dietary patterns NMF, we chose the Brunet algorithm, although we ran the NMF method with other algorithms and found similar results. The choice of protein food groups to be included in order to identify dietary patterns was important as these results are known to be strongly affected by the groups employed [16,45]. The 43 groups used were consistent with those applied in a previous study of dietary protein clusters [18].

Because the eight dietary patterns were identified using protein food groups only, they were not comparable to other dietary pattern studies based on overall food groups. The only other studies to have identified dietary patterns from protein food groups were performed in the US by Mangano et al. [17,18]. Of the five and six of the patterns that were identified during these studies, respectively, five were quite similar to those we found: ('Chicken', 'Fish', 'Processed foods', 'Red meat' and 'Low-fat milk') and one was different ('Legumes' pattern). Their 'Chicken', 'Red meat' and 'Low-fat milk' patterns were consistent with the 'Poultry', 'Beef' and 'Milk' eaters determined in the present study, with the protein intake from chicken, beef and milk, respectively, being significantly higher than in the general population. Our 'Milk drinkers' pattern included all types of milk (not just low-fat milk) because a large majority (85%) of the milk consumed in this French population is semi-skimmed (data not shown). The Fish pattern described by Mangano et al. [17,18] corresponded to the 'Fish eaters' pattern in our study, as fish, fruits and vegetables also contributed significantly more to protein intake in this pattern than in the overall population. The Fast Food/Processed Food pattern corresponded to our 'Take-away eaters', characterized by a major contribution to protein intake of take-away and processed foods. Their Legumes pattern had no equivalent in our study. Finally, the 'Traditional eaters' in our study were not identified in the US study, and may be more specific to the French diet. Indeed, they were characterized by an important contribution of cheese, delicatessen, bread and eggs to protein intake, as has been described in other French studies [16,46].

4.2. Characterization of Dietary Patterns

Dietary patterns were characterized by determining their association with nutrient adequacy. The PANDiet score was updated to account for the most recent nutrient references published by the French authority in 2016 [35]. The probability approach applied to the PANDiet score enabled an accurate assessment of individual PAs, particularly for nutrients with specific distributions such as iron in menstruating women. Moreover, because the bioavailability of protein, iron and zinc was taken into account, this approach could generate the most precise PA estimates. It should be noted that the data for phytate, the percentage of heme iron and amino acids were adapted from different sources, but the mean bioavailability and prevalence of adequacy for zinc and iron were consistent with other studies, which had used different data [47]. Furthermore, as no biological data about individual serum ferritin levels were available, we fixed a cut-off value of 15 mg/L corresponding to a lack of stored iron. Although this hypothesis would overestimate fractional absorption, it still accounted for differences in iron PA between the dietary patterns.

The patterns had clearly different PANDiet scores and thus differed in terms of the overall nutrient adequacy of the diets. However, the PANDiet scores of these patterns were not explained by the same nutrients. Indeed, 'Fish eaters' and 'Milk drinkers' had higher PANDiet scores than the overall population, but this could be explained by both a higher AS and MS in 'Fish eaters', but only a higher AS among 'Milk drinkers'. 'Milk drinkers' had high PA values for vitamins, iodine and calcium but low PAs for SFA and DHA, whereas 'Fish eaters' had high PAs for most nutrients except zinc. Conversely, 'Pork eaters' and 'Take-away eaters' had the lowest PANDiet scores, which could be explained by

a lower AS in ‘Take-away eaters’ while the AS and MS among ‘Pork eaters’ were not significantly lower than in the overall population. ‘Take-away eaters’ had lower PAs for most nutrients, while ‘Pork eaters’ had significantly lower PAs for just a few nutrients (Vitamin B12, Calcium, SFA). Some patterns displayed higher PAs for certain nutrients that are closely associated with the major food contributing to protein intake: thus ‘Traditional eaters’ and ‘Milk drinkers’ had high PA values for calcium that could be attributed to their cheese and milk intakes, ‘Traditional eaters’ and ‘Fish eaters’ had high PAs for EPA and EPA + DHA which falls in line with their fish intake, and ‘Beef eaters’ had high iron and zinc intakes from red meat. However, PA values were not always associated with the main food contributing to protein intake: contrary to what might have been expected given the SFA composition of cheese and delicatessen, ‘Traditional eaters’ did not have lower PA values for SFA than the overall population. Consequently, it appeared that the nutrient profiles of these dietary patterns were also the result of complex food associations that could be complementary.

The diversity of protein sources varied between dietary patterns, but patterns with higher PANDiet scores than the overall population did not all have higher ProtDiv-S scores than the overall population. Indeed, ‘Milk drinkers’ had a higher PANDiet score but not a higher ProtDiv-S score, whereas the opposite was true for ‘Traditional eaters’. This could be explained by the significant ($p < 0.001$) but small associations between the ProtDiv-S and PANDiet scores ($\beta = 0.15$), AS ($\beta = 0.3$) and MS ($\beta = -0.15$).

5. Conclusions

Protein patterns could clearly be identified in the general population and they were associated with socio-demographic characteristics, nutrient adequacy and dietary diversity of protein sources. The ‘Fish eaters’ pattern was found to be associated with high overall nutrient adequacy and protein diversity, whereas the ‘Take-away eaters’ pattern was associated with lower nutrient adequacy and protein diversity. The other patterns were associated with nutrient adequacy that was often linked to the nutrient profile of the food groups contributing most to the interpretation of a protein pattern. A major conclusion of this study is that protein patterns constitute strong elements in the background structure of the dietary intake of a general population and that these patterns are associated with the nutrient profile that they convey. We conclude that protein patterns are important to public nutrition, because protein choices can markedly shape nutrient intake and resulting dietary quality. The manipulation of protein intake could have significant and complex effects on nutrient quality in the general population.

Supplementary Materials: The following are available online at www.mdpi.com/2072-6643/10/2/226/s1, Methods S1: Bioavailability of some nutrients, Methods S2: Reference values used to estimate the probabilities of adequacy of the components of the PANDiet score, Table S1: Odd-ratios (OR) [95% CI] and p-values of socio-demographic determinants of dietary patterns, Table S2: Mean ($\pm$ SD) probabilities of adequacy for components of the PANDiet score and ProtDiv-S, Table S3: Mean ($\pm$ SD) contribution of food groups to protein intake.

Acknowledgments: The authors wish to thank the CIQUAL for their help with the national food composition tables.

Author Contributions: E.G., F.M. and J.-F.H. designed the study. E.G. analyzed the data, performed the statistical analysis and wrote the first draft of the manuscript; F.M., J.-F.H. contributed to writing the manuscript and offered critical comments; E.G., F.M. and J.-F.H. interpreted the results; E.G. and F.M. had primary responsibility for final content; and all authors read and approved the final manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Nijdam, D.; Rood, T.; Westhoek, H. The price of protein: Review of land use and carbon footprints from life cycle assessments of animal food products and their substitutes. *Food Policy* **2012**, *37*, 760–770. [CrossRef]

2. Clarys, P.; Deliens, T.; Huybrechts, I.; Deriemaeker, P.; Vanaelst, B.; De Keyzer, W.; Hebbelinck, M.; Mullie, P. Comparison of nutritional quality of the vegan, vegetarian, semi-vegetarian, pesco-vegetarian and omnivorous diet. *Nutrients* **2014**, *6*, 1318–1332. [CrossRef] [PubMed]
3. Mullee, A.; Vermeire, L.; Vanaelst, B.; Mullie, P.; Deriemaeker, P.; Leenaert, T.; De Henaauw, S.; Dunne, A.; Gunter, M.J.; Clarys, P.; et al. Vegetarianism and meat consumption: A comparison of attitudes and beliefs between vegetarian, semi-vegetarian, and omnivorous subjects in Belgium. *Appetite* **2017**, *114*, 299–305. [CrossRef] [PubMed]
4. Derbyshire, E.J. Flexitarian diets and health: A review of the evidence-based literature. *Front. Nutr.* **2016**, *3*, 55. [CrossRef] [PubMed]
5. Conrad, Z.; Karlsen, M.; Chui, K.; Jahns, L. Diet quality on meatless days: National health and nutrition examination survey (NHANES), 2007–2012. *Public Health Nutr.* **2017**, *20*, 1564–1573. [CrossRef] [PubMed]
6. Tonstad, S.; Clifton, P. 20 - vegetarian diets and the risk of type 2 diabetes. In *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*; Mariotti, F., Ed.; Academic Press: Cambridge, CA, USA, 2017; pp. 355–367.
7. Mann, J. 23-ischemic heart disease in vegetarians and those consuming a predominantly plant-based diet. In *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*; Mariotti, F., Ed.; Academic Press: Cambridge, CA, USA, 2017; pp. 415–427.
8. Dinu, M.; Abbate, R.; Gensini, G.F.; Casini, A.; Sofi, F. Vegetarian, vegan diets and multiple health outcomes: A systematic review with meta-analysis of observational studies. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2017**, *57*, 3640–3649. [CrossRef] [PubMed]
9. Millward, D.J. The nutritional value of plant-based diets in relation to human amino acid and protein requirements. *Proc. Nutr. Soc.* **1999**, *58*, 249–260. [CrossRef] [PubMed]
10. Tome, D. Digestibility issues of vegetable versus animal proteins: Protein and amino acid requirements—functional aspects. *Food Nutr. Bull.* **2013**, *34*, 272–274. [CrossRef] [PubMed]
11. Phillips, S.M.; Fulgoni, V.L.; Heaney, R.P.; Nicklas, T.A.; Slavin, J.L.; Weaver, C.M. Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. *Am. J. Clin. Nutr.* **2015**, *101*, 1346S–1352S. [CrossRef] [PubMed]
12. Anses. Updating of the PNNS guidelines: Revision of the food-based dietary guidelines. *Anses Opinion—Collective Expert Report*. 2016. Available online: <https://www.anses.fr/en/system/files/nut2012sa0103ra-1en.pdf> (accessed on 8 January 2018).
13. Dietary Guidelines Advisory Committee. *Report of the Dietary Guidelines Advisory Committee on the Dietary Guidelines for Americans, 2010*; Secretary of Agriculture and the Secretary of Health and Human Services: Washington, DC, USA, 2010.
14. Wirfält, E.; Drake, I.; Wallström, P. What do review papers conclude about food and dietary patterns? *Food Nutr. Res.* **2013**, *57*, 20523. [CrossRef] [PubMed]
15. Newby, P.; Tucker, K.L. Empirically derived eating patterns using factor or cluster analysis: A review. *Nutr. Rev.* **2004**, *62*, 177–203. [CrossRef] [PubMed]
16. Gazan, R.; Béchaux, C.; Crépet, A.; Sirot, V.; Drouillet-Pinard, P.; Dubuisson, C.; Havard, S. Dietary patterns in the French adult population: A study from the second French national cross-sectional dietary survey (inca2) (2006–2007). *Br. J. Nutr.* **2016**, *116*, 300–315. [CrossRef] [PubMed]
17. Mangano, K.M.; Sahni, S.; Kiel, D.P.; Tucker, K.L.; Dufour, A.B.; Hannan, M.T. Dietary protein is associated with musculoskeletal health independently of dietary pattern: The Framingham third generation study. *Am. J. Clin. Nutr.* **2017**, *105*, 714–722. [CrossRef] [PubMed]
18. Mangano, K.M.; Sahni, S.; Kiel, D.P.; Tucker, K.L.; Dufour, A.B.; Hannan, M.T. Bone mineral density and protein-derived food clusters from the Framingham offspring study. *J. Acad. Nutr. Diet.* **2015**, *115*, 1605–1613. [CrossRef] [PubMed]
19. de Gavelle, E.; Huneau, J.-F.; Bianchi, M.C.; Verger, O.E.; Mariotti, F. Protein adequacy is primarily a matter of protein quantity, not quality: Modeling an increase in plant: Animal protein ratio in French adults. *Nutrients* **2017**, *9*, 1333. [CrossRef] [PubMed]
20. Dubuisson, C.; Lioret, S.; Touvier, M.; Dufour, A.; Calamassi-Tran, G.; Volatier, J.-L.; Lafay, L. Trends in food and nutritional intakes of French adults from 1999 to 2007: Results from the inca surveys. *Br. J. Nutr.* **2010**, *103*, 1035–1048. [CrossRef] [PubMed]
21. Amirabdollahian, F.; Ash, R. An estimate of phytate intake and molar ratio of phytate to zinc in the diet of the people in the United Kingdom. *Public Health Nutr.* **2010**, *13*, 1380–1388. [CrossRef] [PubMed]

22. Centre d'Information des Viandes & INRA. Valeurs Nutritionnelles des Viandes. Available online: <http://www.lessentiellesviandes-pro.org/pdf/PDF-tous%20morceaux.pdf> (accessed on 8 March 2017).
23. Centre d'Information des Viandes. INAPORC: Etude Nutritionnelle de la Viande de Porc Fraiche. Available online: <http://www.lessentiellesviandes-pro.org> (accessed on 8 March 2017).
24. Kongkachuichai, R.; Napatthalung, P.; Charoensiri, R. Heme and nonheme iron content of animal products commonly consumed in Thailand. *J. Food Compos. Anal.* **2002**, *15*, 389–398. [CrossRef]
25. Armah, S.M.; Carriquiry, A.; Sullivan, D.; Cook, J.D.; Reddy, M.B. A complete diet-based algorithm for predicting nonheme iron absorption in adults. *J. Nutr.* **2013**, *143*, 1136–1140. [CrossRef] [PubMed]
26. Hallberg, L.; Hulthen, L. Prediction of dietary iron absorption: An algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. *Am. J. Clin. Nutr.* **2000**, *71*, 1147–1160. [PubMed]
27. Miller, L.V.; Krebs, N.F.; Hambidge, K.M. A mathematical model of zinc absorption in humans as a function of dietary zinc and phytate. *J. Nutr.* **2007**, *137*, 135–141. [CrossRef] [PubMed]
28. Grieger, J.A.; Scott, J.; Cobiac, L. Dietary patterns and breast-feeding in Australian children. *Public Health Nutr.* **2011**, *14*, 1939–1947. [CrossRef] [PubMed]
29. Sy, M.M.; Feinberg, M.; Verger, P.; Barré, T.; Cléménçon, S.; Crépet, A. New approach for the assessment of cluster diets. *Food Chem. Toxicol.* **2013**, *52*, 180–187. [CrossRef] [PubMed]
30. Zetlaoui, M.; Feinberg, M.; Verger, P.; Cléménçon, S. Extraction of food consumption systems by nonnegative matrix factorization (nmf) for the assessment of food choices. *Biometrics* **2011**, *67*, 1647–1658. [CrossRef] [PubMed]
31. Brunet, J.-P.; Tamayo, P.; Golub, T.R.; Mesirov, J.P. Metagenes and molecular pattern discovery using matrix factorization. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2004**, *101*, 4164–4169. [CrossRef] [PubMed]
32. Kaufman, L.; Rousseeuw, P.J. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2009.
33. Verger, E.O.; Mariotti, F.; Holmes, B.A.; Paineau, D.; Huneau, J.-F. Evaluation of a diet quality index based on the probability of adequate nutrient intake (pandiet) using national French and us dietary surveys. *PLoS ONE* **2012**, *7*, e42155. [CrossRef] [PubMed]
34. Bianchi, C.M.; Mariotti, F.; Verger, E.O.; Huneau, J.-F. Pregnancy requires major changes in the quality of the diet for nutritional adequacy: Simulations in the French and the United States populations. *PLoS ONE* **2016**, *11*, e0149858. [CrossRef] [PubMed]
35. Anses. Actualisation des repères du PNNS: Élaboration des références nutritionnelles. *Rapport d'expertise collective*. 2016. Available online: <https://www.Anses.Fr/fr/system/files/nut2012sa0103ra-2.Pdf> (accessed on 8 March 2017).
36. FAO Expert Consultation. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. *FAO Food Nutr. Pap.* **2011**, *92*, 1–66.
37. Anses. Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras. *Rapport d'expertise collective*. 2011. Available online: <https://www.Anses.Fr/fr/system/files/nut2006sa0359ra.Pdf> (accessed on 8 March 2017).
38. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for thiamin. *EFSA J.* **2016**, *14*, 4653.
39. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for vitamin b6. *EFSA J.* **2016**, *14*, e04485.
40. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for phosphorus. *EFSA J.* **2015**, *13*, 4185.
41. Bianchi, C.M.; Egnell, M.; Huneau, J.-F.; Mariotti, F. Plant protein intake and dietary diversity are independently associated with nutrient adequacy in French adults. *J. Nutr.* **2016**, *146*, 2351–2360. [CrossRef] [PubMed]
42. Camilleri, G.M.; Verger, E.O.; Huneau, J.-F.; Carpentier, F.; Dubuisson, C.; Mariotti, F. Plant and animal protein intakes are differently associated with nutrient adequacy of the diet of French adults. *J. Nutr.* **2013**, *143*, 1466–1473. [CrossRef] [PubMed]
43. Gaujoux, R.; Seoighe, C. A flexible r package for nonnegative matrix factorization. *BMC Bioinform.* **2010**, *11*, 367. [CrossRef] [PubMed]
44. Quatromoni, P.; Copenhafer, D.; Demissie, S.; D'Agostino, R.; O'Horo, C.; Nam, B.; Millen, B. The internal validity of a dietary pattern analysis. The Framingham nutrition studies. *J. Epidemiol. Commun. Health* **2002**, *56*, 381–388. [CrossRef]

45. McCann, S.E.; Marshall, J.R.; Brasure, J.R.; Graham, S.; Freudenheim, J.L. Analysis of patterns of food intake in nutritional epidemiology: Food classification in principal components analysis and the subsequent impact on estimates for endometrial cancer. *Public Health Nutr.* **2001**, *4*, 989–997. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
46. Mathe, T.; Francou, A.; Colin, J.; Hebel, P. Comparaison des modèles alimentaires français et états-uniens. *Cahier de recherche du CREDOC* **2011**, *283*, 1–71.
47. Perignon, M.; Barré, T.; Gazan, R.; Amiot, M.-J.; Darmon, N. The bioavailability of iron, zinc, protein and vitamin a is highly variable in French individual diets: Impact on nutrient inadequacy assessment and relation with the animal-to-plant ratio of diets. *Food Chem.* **2018**, *238*, 73–81. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]



© 2018 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Methods S1: Bioavailability of some nutrients

As underlined by some authors [1-3], bioavailability of many nutrients varies between food sources, and particularly between animal and plant sources. Recent literature has reported factors influencing bioavailability for nutrients like protein, zinc, iron, calcium or vitamin A.

Vitamin A

Vitamin A intake comes from two majors sources: preformed vitamin A (retinol) from animal sources and provitamin A carotenoids, such as β -carotene, from plant sources. As reported by the IOM and EFSA, many conversion factors have been determined to express β -carotene as a retinol equivalent. These factors are highly dependent on individual related factors such as genetics, age, sex, nutritional status, or digestive dysfunctions, as well as food processing or food matrix [4,5].

Against this background, it was considered that data on conversion factors for some specific foods could not be used as it was dependent on individual related factors and food processing and matrix. We chose to use the IOM's 12:1 conversion factors for β -carotene to retinol equivalent for all food items [5].

Calcium

Studies showed that calcium absorption was similar for the major food contributing to its intake. However, foods rich in oxalic and phytic acid lower calcium absorption, which varies also depending the time of consumption and the amount consumed. Furthermore, sodium and protein intake are consider to influence calcium requirements [6].

As available data did not provide any predictive equation to estimate the link between oxalic and phytic acid, protein or sodium intake and calcium bioavailability, we considered bioavailability to be similar in all food items.

Zinc

Phytate intake was found to be the major limitation of zinc absorption. A mathematical model was used to predict zinc absorption as a function of dietary zinc and phytate intakes [7]:

$$TAZ = 0.5 \times \left\{ 0.13 + TDZ + 0.10 \left(1 + \frac{TDP}{1.2} \right) - \sqrt{\left(0.13 + TDZ + 0.10 \left(1 + \frac{TDP}{1.2} \right) \right)^2 - 4 \times 0.13 \times TDZ} \right\}$$

TAZ: total absorbed zinc (mmol), TDZ: total dietary zinc (mmol) and TDP: total dietary phytate (mmol).

Iron

Iron intakes comes from two majors forms: heme and nonheme iron. Heme iron is only found in animal sources. Nonheme iron absorption mainly depends on the nutritional status of

individuals, but also on dietary factors such as vitamin C, meat, fish and poultry, tea, phytate and calcium intakes. We used the following equation to predict nonheme iron absorption [8]:

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

Heme iron Absorption was calculated from the following equation [9]:

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

where SF is serum ferritin (mg/L), C is vitamin C (mg), MFP is meat, fish, and poultry (g), T is tea (number of cups), P is phytate (mg), Ca is calcium (mg), and NH is nonheme iron (mg).

As no data was available on serum ferritin of individuals, it was set to the cut off value for low stores of 15 mg/L. Although this hypothesis overestimates the absorption, it does not impact the relative PANDiet score between dietary patterns.

Protein

Protein quality depends on two major factors: the digestibility and the amino acid profile. Both factors are taken into account by the Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) developed by the FAO [10]. As there is no inadequate intake of amino acids for any of the individuals in the initial situation, there is no need to use an amino acid score.

To take into account the lower digestibility of plant proteins, a penalty of 5% was applied to protein intake from plant protein food items. This coefficient was calculated from the true ileal protein digestibility studies in humans by calculating the difference between the mean digestibility of studies with plant protein food diets and the mean digestibility of studies with animal protein food diets, weighted by the sample size in studies [11,12].

Methods S2. Reference values used to estimate the probabilities of adequacy of the components of the PANDiet score

Like the method set in the 2016 Anses opinion, if an EAR from an EFSA opinion was more recent than the Anses opinion, we used this value instead of the 2016 Anses value.

Protein

We used the value of 0.66g/kg bw endorsed by Anses, which is adapted to each individual, rather than the lower bound of the acceptable distribution range expressed as percent of energy intake.

Likewise, we used the value of the 2,2g/kg bw as an upper bound value used to set the upper bound of the acceptable distribution range.

Total fat and fatty acids

In the Anses opinion, the lower bound reference value for total was set to 35% of the EIEA to ensure an adequate intake of DHA. However, the opinion also stated that the minimal requirement is 30% of the EIEA. As EPA and DHA intakes are already taken into account in the PANDiet score, it was decided to use the 30% value to set the reference intake for the PANDiet calculation.

EAR for LA, ALA, DHA, DHA + EPA were calculated from the 2011 Anses opinion by dividing the AI by 1.3 (considering a variability of 15%).

The upper bound value of 40% of the EIEA of the Anses opinion was used in this study, and the value of 12% of EIEA for saturated fatty acids of the 2011 opinion was used.

Anses did not set any upper bound value for cholesterol, but it was decided to set the value of 300mg/d previously used by the IOM [13].

Carbohydrates

It was decided that the values for the acceptable distribution range for carbohydrate intake would not be included in the PANDiet score because this estimation was based of the reference values for protein, fibres and total fat intakes, which are already taken into account in the PANDiet.

The upper bound value of 100g/d for sugars (except from lactose) was used in this study. The lactose intake was estimated as described in the Anses opinion.

Fibers

A pseudo-EAR was calculated from the Adequate Intake of 30g/d published by Anses and a standard variability of 15% and set to 23g/d.

Vitamin A

The EAR of 570 or 490 µg/d and the variability of 15% set by Anses was used in this study, as well as the upper bound value of 3000 µg for retinol only.

Thiamin

EFSA published an opinion on the EAR for thamin after the Anses opinion [14]. It was decided to use the value of 0.3 mg/1000 kcal (20%) set by EFSA.

Riboflavin

A pseudo EAR was calculated from the Adequate Intake of 0.71MJ/1000kcal (15%) published by Anses and set to 0.55mg/1000kcal.

Niacin

The EAR of 5.44mg of niacin equivalent /1000kcal/d (10%) set by Anses was used in this study. To calculate the niacin equivalent intake we added the niacin intake with 1/60^e of the tryptophan intake as described in the opinion. The upper bound value was set to 900 mg of NE, considering that the whole niacin intake was nicotinamide.

Pantothenic acid

The Anses opinion set an AI of 5.8 (men) or 4.7 mg/d (women) of pantothenic acid based on the mean intake in the INCA2 population. It was decided to calculate a pseudo-EAR based on a variability of 30% corresponding to the variability of intake in INCA2. Thus, for an intake of 5.8 or 4.7 mg/d, individuals have a 2.5% probability of inadequate intake.

The pseudo-EAR calculated was 3.62 or 2.94 mg/d (30%).

Vitamin B6

EFSA published an opinion on the EAR for vitamin B6 after the Anses opinion [15]. It was decided to use the value of 1.5 or 1.3 mg/d (10%) set by EFSA. The upper bound limit of 25mg/d set in the Anses opinion was used in this study.

Folate

The EAR of 250 µg/d and the variability of 15% set by Anses was used in this study. The upper bound value was set to 1170 by adding the 5^e percentile of intake to the value set by Anses, considering that the lower folate consumers did not consume any folic acid.

Vitamin B12

A pseudo EAR was calculated from the AI of 4 µg/d considering a variability of 10% as in the previous Anses opinion. Thus the pseudo-EAR was set to 3.33 µg/d (10%).

Vitamin C

The EAR of 90 mg/d and the variability of 10% set by Anses was used in this study.

Vitamin D

The EAR of 10 µg/d and the variability of 25% set by Anses was used in this study, as well as the upper bound value of 100 µg/d.

Vitamin E

The Anses opinion set an AI of 10.5 (men) or 9.9 (women) mg/d of vitamin E based on the mean intake in the INCA2 population. It was decided to calculate a pseudo-EAR based on a variability of 40% corresponding to the variability of intake in INCA2. Thus, for an intake of 10.5 or 9.9 mg/d, individuals have a 2.5% probability of inadequate intake.

The pseudo-EAR calculated was 5.8 or 5.5 mg/d (40%).

Calcium

The EAR of 860 mg/d for individuals younger than 24 y.o. or 750 g/d set by Anses was used in this study. The variability of 13% was used for individuals > 24 y.o. as it was calculated from balance studies. As no variability was set for young adults, we considered the standard variability of 15%. The upper bound value of 2500 mg/d set by Anses was used.

Copper

The EAR of 1 or 0.8 mg/d and the variability of 15% set by Anses was used in this study, as well as the upper bound limit of 10 mg/d.

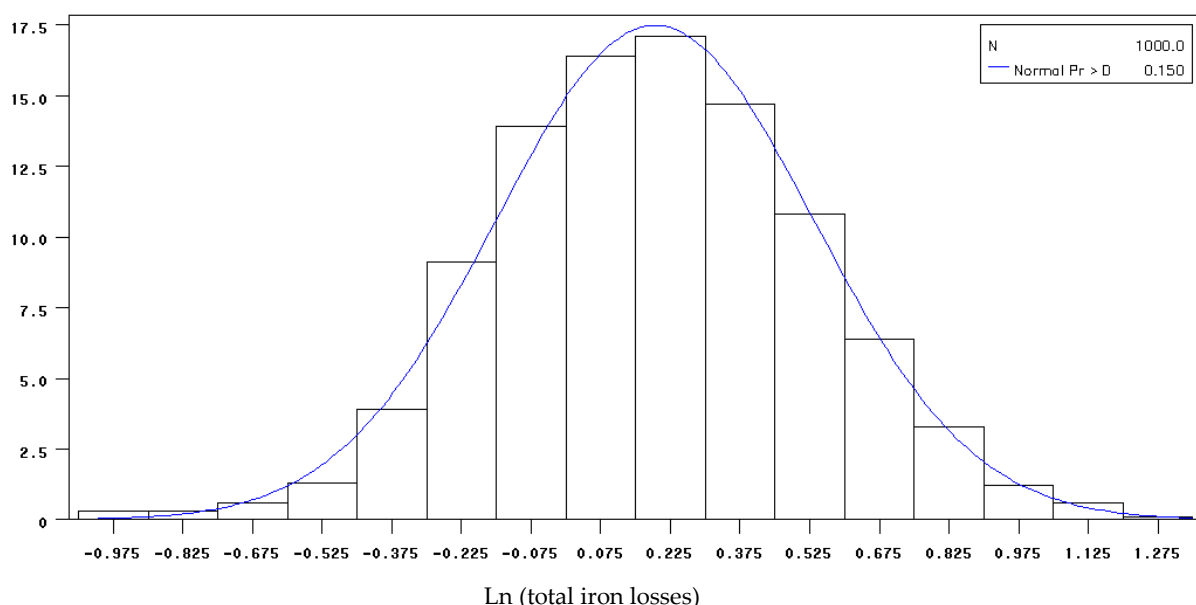
Iodine

No EAR was set by Anses, thus a pseudo-EAR was calculated from the AI of 150 µg/d considering a variability of 20%, as set by the IOM from balance studies. The upper bound value was set to 600µg/d like in the Anses opinion.

Iron

We compared bioavailable iron intake to physiological requirements, as the bioavailability of iron was taken into account in this study.

For men and non-menstruating women, we used the raw EAR values used by Anses to calculate the 6 mg/d EAR. Thus we considered an EAR of 0.95 mg/d and a variability of 40%. For menstruating women, as the distribution of their requirements is not normal, we modelled the distribution using a lognormal function, by adding the basal iron losses (normally distributed) to the menstrual losses (exponentially distributed, $\lambda=\ln(2)/0.28$), as detailed in the Anses opinion, with a Monte-Carlo simulation on 1000 individuals. The combination of basal and menstrual losses followed a lognormal distribution ($p = 0.15$).



Thus it was considered that the logarithm of the physiological requirements followed a normal distribution ($\mu=0.18$, $\sigma=0.34$).

Magnesium

The AI set in the Anses opinion resulted from the 2001 Anses opinion where an EAR of 5 mg/kg b.w/d was defined. It was decided to use this value as it was more precise for an individual approach. However it was decided to set the variability to the standard variability of 15% as the 10% used previously corresponded the standard variability of the IOM.

It was considered that only Mg from mineral water was dissociable Mg, thus the upper bound value of 250mg/d was set only from Mg from mineral water.

Manganese

The Anses opinion set an AI of 2.8 or 2.5 mg/d of manganese based on the mean intake in the INCA2 population. It was decided to calculate a pseudo-EAR based on a variability of 40% corresponding to the variability of intake in INCA2. Thus, for an intake of 1.5 or 1.4 mg/d, individuals have a 2.5% probability of inadequate intake.

The pseudo-EAR calculated was 1.5 or 1.4 mg/d (40%).

Phosphorus

Anses decided to follow the EFSA opinion on phosphorus dietary values [16]. In this opinion, EFSA considered a calcium to phosphorus molar ratio of 1.4:1 and the AI of calcium to set the reference value of 550 mg/d.

It is also stated that the calcium to phosphorus molar ratio in the body ranges from 1.9:1 to 1.4:1.

In order to have a 2.5% of inadequate intake in the population for a 1.4:1 molar ratio (which is the method used by EFSA), and a 97.5% inadequate intake for a 1.9:1 molar ratio, it was decided to set the pseudo molar EAR to the molar calcium intake divided by 1.65, with a variability of 7.5%.

The formula used to assess the probability of inadequacy was:

$$F\left(\frac{P(\text{mol/d}) - \frac{Ca(\text{mol/d})}{1.65}}{\sqrt{\left(7.5\% \times \frac{Ca(\text{mol/d})}{1.65}\right)^2 + SD_{Ca}^2/n + SD_P^2/n}}\right)$$

F was “probnorm” function in SAS

P(mol/d) was the mean phosphorus molar intake

Ca(mol/d) was the mean calcium molar intake

SD_P² was the interindividual variability of P intake

SD_{Ca}² was the interindividual variability of Ca intake

Potassium

Anses considered that a sodium to potassium molar ratio of 1:1 was adequate for the population. Thus we calculated a pseudo molar EAR by dividing the sodium intake by 1.3, considering a standard 15% variability of requirement. Thus, an individual with a molar ratio of 1:1 would have a 2.5% probability of inadequate intake.

The formula used to assess the probability of inadequacy was:

$$F\left(\frac{K(\text{mol/d}) - \frac{Na(\text{mol/d})}{1.3}}{\sqrt{\left(15\% \times \frac{Na(\text{mol/d})}{1.3}\right)^2 + SD_{Na}^2/n + SD_K^2/n}}\right)$$

F was “probnorm” function in SAS
K(mol/d) was the mean potassium molar intake
Na(mol/d) was the mean sodium molar intake
SD_K² was the interindividual variability of K intake
SD_{Na}² was the interindividual variability of Na intake

Selenium

No EAR was set by Anses, thus a pseudo-EAR was calculated from the AI of 70 µg/d considering a standard variability of 15%. Thus the pseudo-EAR considered was 54 µg/d (15%). The upper bound value of 300µg/d was used in this study.

Sodium

Anses did not set any upper tolerable limit, but an upper bound value based on the median intake in the INCA2 population. In the population in this study, median sodium intakes were 3312 or 2483 mg/d with a 30% variability, and those values were chosen as reference values for men and women.

Zinc

As bioavailability of zinc was taken into account in this study, the requirement of 0.642 + 0.038 * b.w. mg/d was considered, as described in the Anses opinion. The upper bound limit of 25 mg/d was used in this study

Table S1. Odd-ratios (OR) [95% CI] and p-values¹ of socio-demographic determinants of dietary patterns

	Processed meat eaters		Poultry eaters		Pork eaters		Traditional eaters		Milk drinkers		Take-away eaters		Beef eaters		Fish eaters	
Effect	OR [CI 95%]	P-value	OR [CI 95%]	P-value	OR [CI 95%]	P-value	OR [CI 95%]	P-value	OR [CI 95%]	P-value	OR [CI 95%]	P-value	OR [CI 95%]	P-value	OR [CI 95%]	P-value
Sex		0.645		0.043		0.305		0.274		0.035		0.718		0.013		0.132
M vs W	0.9 [0.59 ; 1.39]	0.645	1.67 [1.02 ; 2.75]	0.043	1.22 [0.83 ; 1.8]	0.305	0.84 [0.61 ; 1.15]	0.274	0.65 [0.44 ; 0.97]	0.035	0.92 [0.59 ; 1.44]	0.718	1.59 [1.1 ; 2.29]	0.013	0.64 [0.35 ; 1.15]	0.132
Age		0.896		0.761		0.684		0.004		0.551		0.000		0.404		0.318
50+ vs 18-24	0.94 [0.45 ; 1.99]	0.808	0.8 [0.31 ; 2.08]	0.790	1.54 [0.63 ; 3.79]	0.664	2.12 [1.04 ; 4.32]	0.001	0.93 [0.44 ; 1.98]	0.308	0.28 [0.14 ; 0.58]	0.001	0.81 [0.4 ; 1.63]	0.210	1.58 [0.52 ; 4.82]	0.089
35-49 vs 18-24	0.92 [0.42 ; 2.01]	0.917	0.94 [0.37 ; 2.41]	0.597	1.73 [0.7 ; 4.26]	0.256	1.5 [0.72 ; 3.1]	0.414	1.25 [0.59 ; 2.63]	0.437	0.4 [0.2 ; 0.78]	0.060	0.96 [0.47 ; 1.95]	0.831	1.02 [0.32 ; 3.25]	0.863
24-34 vs 18-24	0.77 [0.33 ; 1.77]	0.439	0.69 [0.25 ; 1.91]	0.395	1.56 [0.61 ; 4]	0.650	1.01 [0.47 ; 2.17]	0.093	1.29 [0.6 ; 2.77]	0.370	0.84 [0.43 ; 1.63]	0.014	1.23 [0.59 ; 2.55]	0.185	0.79 [0.23 ; 2.75]	0.330
Education		0.157		0.428		0.106		0.005		0.162		0.393		0.796		0.684
Post-secondary vs Primary	0.57 [0.29 ; 1.1]	0.261	0.9 [0.46 ; 1.76]	0.689	0.55 [0.31 ; 1.01]	0.164	1.83 [1.23 ; 2.73]	0.048	1.28 [0.78 ; 2.12]	0.865	0.9 [0.5 ; 1.6]	0.746	0.86 [0.53 ; 1.42]	0.733	0.76 [0.35 ; 1.66]	0.392
Secondary vs Primary	0.68 [0.38 ; 1.22]	0.751	0.63 [0.31 ; 1.27]	0.229	0.69 [0.41 ; 1.17]	0.792	1.6 [1.09 ; 2.36]	0.349	1.52 [0.98 ; 2.35]	0.159	0.67 [0.37 ; 1.19]	0.223	0.88 [0.55 ; 1.41]	0.819	1.1 [0.54 ; 2.21]	0.503
City size		0.424		0.563		0.972		0.438		0.341		0.132		0.938		0.701
rural vs > 100 000	1.41 [0.73 ; 2.72]	0.210	0.73 [0.34 ; 1.59]	0.322	1.07 [0.61 ; 1.89]	0.836	1.33 [0.82 ; 2.15]	0.199	1.1 [0.62 ; 1.98]	0.854	0.51 [0.25 ; 1.05]	0.156	0.9 [0.51 ; 1.6]	0.731	0.68 [0.28 ; 1.66]	0.426
> 2000 vs > 100 000	0.93 [0.58 ; 1.5]	0.287	1.09 [0.64 ; 1.85]	0.352	1.03 [0.66 ; 1.61]	0.989	1 [0.7 ; 1.43]	0.414	1.34 [0.89 ; 2.02]	0.199	0.69 [0.42 ; 1.13]	0.879	0.97 [0.65 ; 1.46]	0.898	0.9 [0.48 ; 1.68]	0.775
Loc. of the household		0.075		0.592		0.283		0.671		0.895		0.057		0.987		0.088
City center vs dispersed housing	1.63 [0.64 ; 4.12]	0.843	1.54 [0.57 ; 4.18]	0.606	0.56 [0.3 ; 1.07]	0.295	1.02 [0.57 ; 1.83]	0.780	0.82 [0.43 ; 1.56]	0.726	0.81 [0.39 ; 1.7]	0.307	1.14 [0.56 ; 2.29]	0.782	3.61 [0.78 ; 16.67]	0.173
Suburbs vs dispersed housing	2.64 [1.1 ; 6.34]	0.021	1.31 [0.49 ; 3.51]	0.823	0.58 [0.32 ; 1.07]	0.346	1.25 [0.71 ; 2.17]	0.241	0.86 [0.46 ; 1.6]	0.954	0.47 [0.22 ; 1.02]	0.079	1.1 [0.56 ; 2.18]	0.909	2.26 [0.49 ; 10.51]	0.779
Village vs dispersed housing	1.95 [0.87 ; 4.35]	0.501	1.76 [0.7 ; 4.44]	0.262	0.65 [0.38 ; 1.12]	0.809	1.01 [0.61 ; 1.68]	0.712	0.8 [0.45 ; 1.44]	0.665	0.53 [0.25 ; 1.1]	0.282	1.1 [0.58 ; 2.07]	0.926	4.42 [1.01 ; 19.24]	0.035
Occupational status		0.424		0.563		0.972		0.438		0.341		0.132		0.938		0.701
Low vs very high	0.74 [0.41 ; 1.35]	0.637	1.92 [0.87 ; 4.22]	0.490	1.38 [0.78 ; 2.44]	0.428	0.84 [0.5 ; 1.43]	0.377	0.8 [0.43 ; 1.48]	0.855	2.12 [1.04 ; 4.31]	0.073	0.65 [0.36 ; 1.16]	0.169	0.56 [0.19 ; 1.63]	0.152
Medium vs very high	0.53 [0.32 ; 0.86]	0.171	1.7 [0.84 ; 3.45]	0.828	0.99 [0.59 ; 1.64]	0.215	1.09 [0.74 ; 1.61]	0.392	0.88 [0.55 ; 1.38]	0.708	1.79 [0.98 ; 3.29]	0.187	0.91 [0.57 ; 1.44]	0.616	1.01 [0.52 ; 1.97]	0.843
High vs very high	0.52 [0.22 ; 1.23]	0.404	2.18 [0.88 ; 5.36]	0.298	1.49 [0.73 ; 3.05]	0.343	1.03 [0.62 ; 1.73]	0.796	0.68 [0.34 ; 1.35]	0.387	1.11 [0.44 ; 2.8]	0.396	0.87 [0.45 ; 1.67]	0.891	1.54 [0.6 ; 3.98]	0.148

¹ OR and p-values from logistic regression comparing the dietary pattern with the overall population, each variable independently of the others.

Table S2. Mean ($\pm$ SD) probabilities of adequacy for components of the PANDiet score and ProtDiv-S

Nutrient	Processed meat eaters	Poultry eaters	Pork eaters	Traditionnal eaters	Milk drinkers	Take-away eaters	Beef eaters	Fish eaters	ProbF
PANDiet	57.99 $\pm$ 5.61	55.97 $\pm$ 6.41	56.47 $\pm$ 4.8 *-	58.03 $\pm$ 5.76	58.88 $\pm$ 5.44 *+	53.71 $\pm$ 5.57 *-	57.88 $\pm$ 6.61	61.79 $\pm$ 6.86 *+	<.0001
AS	64.18 $\pm$ 11.22	62.39 $\pm$ 12.14	64.39 $\pm$ 9.11	65.92 $\pm$ 10.18 *+	67.32 $\pm$ 9.66 *+	58.35 $\pm$ 11.54 *-	62.69 $\pm$ 11.66	67.97 $\pm$ 9.95 *+	<.0001
Protein	0.98 $\pm$ 0.05	0.99 $\pm$ 0.03	0.99 $\pm$ 0.04	0.98 $\pm$ 0.07	0.98 $\pm$ 0.07	0.97 $\pm$ 0.08 *-	0.98 $\pm$ 0.06	0.98 $\pm$ 0.06	0.0593
Total fat	0.8 $\pm$ 0.21	0.82 $\pm$ 0.25	0.86 $\pm$ 0.16 *+	0.86 $\pm$ 0.19	0.85 $\pm$ 0.19	0.86 $\pm$ 0.19	0.8 $\pm$ 0.25 *-	0.8 $\pm$ 0.21	0.0040
LA	0.6 $\pm$ 0.34	0.67 $\pm$ 0.33 *+	0.56 $\pm$ 0.33	0.6 $\pm$ 0.32	0.54 $\pm$ 0.35 *-	0.52 $\pm$ 0.36	0.56 $\pm$ 0.38	0.7 $\pm$ 0.31	<.0001
ALA	0.08 $\pm$ 0.17	0.08 $\pm$ 0.18	0.08 $\pm$ 0.16	0.13 $\pm$ 0.23	0.08 $\pm$ 0.17	0.06 $\pm$ 0.12 *-	0.07 $\pm$ 0.19	0.2 $\pm$ 0.26 *+	0.0002
DHA	0.32 $\pm$ 0.34	0.28 $\pm$ 0.33	0.31 $\pm$ 0.3	0.45 $\pm$ 0.34 *+	0.26 $\pm$ 0.32 *-	0.22 $\pm$ 0.32 *-	0.28 $\pm$ 0.36	0.57 $\pm$ 0.3 *+	<.0001
EPA+DHA	0.27 $\pm$ 0.32	0.22 $\pm$ 0.31	0.26 $\pm$ 0.29	0.4 $\pm$ 0.34 *+	0.22 $\pm$ 0.3	0.19 $\pm$ 0.3 *-	0.24 $\pm$ 0.34	0.49 $\pm$ 0.3 *+	<.0001
Fibers	0.32 $\pm$ 0.34	0.22 $\pm$ 0.29	0.22 $\pm$ 0.25 *-	0.26 $\pm$ 0.3 *+	0.2 $\pm$ 0.26	0.13 $\pm$ 0.21 *-	0.19 $\pm$ 0.28	0.39 $\pm$ 0.34 *+	<.0001
Vit A	0.69 $\pm$ 0.32	0.56 $\pm$ 0.37	0.66 $\pm$ 0.29	0.72 $\pm$ 0.28 *+	0.71 $\pm$ 0.3	0.54 $\pm$ 0.36 *-	0.53 $\pm$ 0.37 *-	0.7 $\pm$ 0.31	<.0001
Vit B1	0.98 $\pm$ 0.04	0.97 $\pm$ 0.06	0.99 $\pm$ 0.02 *+	0.98 $\pm$ 0.05	0.99 $\pm$ 0.02 *+	0.97 $\pm$ 0.07 *-	0.97 $\pm$ 0.07 *-	0.97 $\pm$ 0.06	<.0001
Vit B2	0.93 $\pm$ 0.11	0.85 $\pm$ 0.24	0.91 $\pm$ 0.15	0.91 $\pm$ 0.17	0.99 $\pm$ 0.04 *+	0.84 $\pm$ 0.23 *-	0.88 $\pm$ 0.22	0.87 $\pm$ 0.22	<.0001
Vit B3	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0	0.7727
Vit B5	0.9 $\pm$ 0.16	0.9 $\pm$ 0.16	0.91 $\pm$ 0.12	0.92 $\pm$ 0.11	0.96 $\pm$ 0.07 *+	0.83 $\pm$ 0.2 *-	0.91 $\pm$ 0.13	0.9 $\pm$ 0.15	<.0001
Vit B6	0.71 $\pm$ 0.32	0.74 $\pm$ 0.31 *+	0.72 $\pm$ 0.29	0.68 $\pm$ 0.3	0.72 $\pm$ 0.3	0.5 $\pm$ 0.36 *-	0.71 $\pm$ 0.33	0.71 $\pm$ 0.32	<.0001
Vit B9	0.65 $\pm$ 0.34	0.59 $\pm$ 0.38	0.64 $\pm$ 0.29	0.73 $\pm$ 0.28 *+	0.7 $\pm$ 0.32 *+	0.53 $\pm$ 0.33 *-	0.57 $\pm$ 0.36 *-	0.72 $\pm$ 0.3 *+	<.0001
Vit B12	0.77 $\pm$ 0.28	0.74 $\pm$ 0.31 *-	0.74 $\pm$ 0.28 *-	0.75 $\pm$ 0.28	0.85 $\pm$ 0.22 *+	0.73 $\pm$ 0.32 *-	0.82 $\pm$ 0.25 *+	0.68 $\pm$ 0.33	<.0001
Vit C	0.36 $\pm$ 0.4	0.36 $\pm$ 0.42	0.34 $\pm$ 0.34	0.38 $\pm$ 0.36	0.42 $\pm$ 0.38 *+	0.27 $\pm$ 0.38 *-	0.32 $\pm$ 0.39	0.47 $\pm$ 0.37 *+	<.0001
Vit D	0.02 $\pm$ 0.06	0.03 $\pm$ 0.11	0.02 $\pm$ 0.07	0.04 $\pm$ 0.08 *+	0.03 $\pm$ 0.08	0.02 $\pm$ 0.06 *-	0.03 $\pm$ 0.1	0.03 $\pm$ 0.07	0.1019
Vit E	0.86 $\pm$ 0.19	0.89 $\pm$ 0.15	0.87 $\pm$ 0.17	0.91 $\pm$ 0.14 *+	0.9 $\pm$ 0.15	0.85 $\pm$ 0.19 *-	0.83 $\pm$ 0.22 *-	0.95 $\pm$ 0.1 *+	<.0001
Calcium	0.52 $\pm$ 0.38 *-	0.5 $\pm$ 0.41 *-	0.59 $\pm$ 0.35 *-	0.66 $\pm$ 0.33 *+	0.87 $\pm$ 0.21 *+	0.58 $\pm$ 0.35 *-	0.5 $\pm$ 0.37 *-	0.62 $\pm$ 0.35	<.0001
Copper	0.86 $\pm$ 0.21	0.8 $\pm$ 0.3	0.88 $\pm$ 0.16	0.91 $\pm$ 0.15 *+	0.84 $\pm$ 0.22	0.82 $\pm$ 0.25 *-	0.83 $\pm$ 0.25	0.91 $\pm$ 0.16 *+	<.0001
Iodine	0.55 $\pm$ 0.3 *-	0.52 $\pm$ 0.35 *-	0.59 $\pm$ 0.29	0.62 $\pm$ 0.29	0.8 $\pm$ 0.22 *+	0.56 $\pm$ 0.31 *-	0.56 $\pm$ 0.34 *-	0.67 $\pm$ 0.26 *+	<.0001
Iron	0.75 $\pm$ 0.25 *+	0.7 $\pm$ 0.29	0.72 $\pm$ 0.23	0.59 $\pm$ 0.27 *-	0.64 $\pm$ 0.25	0.56 $\pm$ 0.31 *-	0.76 $\pm$ 0.27 *+	0.62 $\pm$ 0.23	<.0001
Magnesium	0.37 $\pm$ 0.35	0.37 $\pm$ 0.38	0.37 $\pm$ 0.3	0.42 $\pm$ 0.34	0.4 $\pm$ 0.31	0.32 $\pm$ 0.35 *-	0.37 $\pm$ 0.35	0.48 $\pm$ 0.35 *+	0.0007
Manganese	0.88 $\pm$ 0.15	0.83 $\pm$ 0.18	0.87 $\pm$ 0.15	0.92 $\pm$ 0.12 *+	0.84 $\pm$ 0.17 *-	0.84 $\pm$ 0.18 *-	0.85 $\pm$ 0.18	0.92 $\pm$ 0.11 *+	<.0001
Phosphorus	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0.02	1 $\pm$ 0.01	1 $\pm$ 0	1 $\pm$ 0.01	1 $\pm$ 0.04	1 $\pm$ 0	0.6386
Potassium	0.26 $\pm$ 0.25 *-	0.31 $\pm$ 0.28 *+	0.32 $\pm$ 0.26	0.27 $\pm$ 0.26 *-	0.34 $\pm$ 0.24 *+	0.2 $\pm$ 0.21 *-	0.33 $\pm$ 0.29	0.44 $\pm$ 0.26 *+	<.0001
Selenium	0.84 $\pm$ 0.17	0.84 $\pm$ 0.19	0.87 $\pm$ 0.12	0.86 $\pm$ 0.13	0.86 $\pm$ 0.13	0.8 $\pm$ 0.17 *-	0.84 $\pm$ 0.16	0.88 $\pm$ 0.12 *+	<.0001
Zinc	0.36 $\pm$ 0.26	0.35 $\pm$ 0.29	0.39 $\pm$ 0.27	0.29 $\pm$ 0.25 *-	0.42 $\pm$ 0.27	0.35 $\pm$ 0.3	0.48 $\pm$ 0.28 *+	0.25 $\pm$ 0.24 *-	<.0001
MS	51.79 $\pm$ 14.07	49.56 $\pm$ 12.75	48.56 $\pm$ 10.95	50.14 $\pm$ 12.68	50.43 $\pm$ 12.39	49.07 $\pm$ 11.73	53.08 $\pm$ 14.35 *+	55.6 $\pm$ 12.78 *+	0.0013
Protein	0.97 $\pm$ 0.1	0.94 $\pm$ 0.17 *-	0.96 $\pm$ 0.08	0.97 $\pm$ 0.09	0.98 $\pm$ 0.05	0.97 $\pm$ 0.11	0.97 $\pm$ 0.07	0.97 $\pm$ 0.08	0.0006
Total fat	0.66 $\pm$ 0.24	0.63 $\pm$ 0.26	0.58 $\pm$ 0.24 *-	0.58 $\pm$ 0.25 *-	0.62 $\pm$ 0.23 *+	0.61 $\pm$ 0.24	0.65 $\pm$ 0.27	0.66 $\pm$ 0.23	<.0001
SFA	0.26 $\pm$ 0.28 *+	0.26 $\pm$ 0.31	0.15 $\pm$ 0.19 *-	0.18 $\pm$ 0.23	0.13 $\pm$ 0.2 *-	0.15 $\pm$ 0.19	0.23 $\pm$ 0.29	0.34 $\pm$ 0.3 *+	<.0001
Cholesterol	0.41 $\pm$ 0.33	0.33 $\pm$ 0.32 *-	0.38 $\pm$ 0.3	0.48 $\pm$ 0.33	0.48 $\pm$ 0.32	0.48 $\pm$ 0.32	0.45 $\pm$ 0.37	0.57 $\pm$ 0.3 *+	0.0002
Sugar	0.74 $\pm$ 0.32	0.66 $\pm$ 0.39	0.7 $\pm$ 0.31	0.72 $\pm$ 0.31	0.69 $\pm$ 0.34	0.61 $\pm$ 0.39 *-	0.73 $\pm$ 0.34	0.65 $\pm$ 0.31	0.0275
Sodium	0.1 $\pm$ 0.15	0.16 $\pm$ 0.2	0.14 $\pm$ 0.18	0.1 $\pm$ 0.15 *-	0.12 $\pm$ 0.15	0.12 $\pm$ 0.16	0.16 $\pm$ 0.21 *+	0.15 $\pm$ 0.16 *+	<.0001
ProtDiv-S	69.06 $\pm$ 12.51	68.19 $\pm$ 14.08	68.03 $\pm$ 12.33	70.13 $\pm$ 12.01 *+	67.58 $\pm$ 12.89	63.72 $\pm$ 13.2 *-	63.88 $\pm$ 14.87 *-	71.41 $\pm$ 11.88 *+	<.0001

+/-, significantly higher or lower than the overall population mean; ProbF, p-value of the ANOVA testing the dietary pattern effect on the probability of adequacy

Table S5. Mean ($\pm$ SD) contribution of food groups¹ to protein intake

Nutrient	Processed meat eaters	Poultry eaters	Pork eaters	Traditional eaters	Milk drinkers	Take-away eaters	Beef eaters	Fish eaters	ProbF
Animal	67.79 $\pm$ 7.74	72.79 $\pm$ 7.94 *+	71.03 $\pm$ 7.05 *+	66.22 $\pm$ 7.87 *-	71.03 $\pm$ 5.63 *+	66.36 $\pm$ 8.03 *-	69.64 $\pm$ 8.04	65.37 $\pm$ 10.52 *-	<.0001
Meat (except poultry)	18.75 $\pm$ 9.06	14.13 $\pm$ 7.8 *-	24.91 $\pm$ 8.74 *+	11 $\pm$ 6.3 *-	14.98 $\pm$ 8.67 *-	16.91 $\pm$ 10.18	27.46 $\pm$ 9.01 *+	13.68 $\pm$ 8.63 *-	<.0001
Poultry	11.05 $\pm$ 8.39 *+	26.74 $\pm$ 9.96 *+	7.6 $\pm$ 7.29 *-	8.52 $\pm$ 6.14	8.33 $\pm$ 5.83 *-	5.99 $\pm$ 5.96 *-	6.31 $\pm$ 7.09 *-	9.65 $\pm$ 6.46	<.0001
Game	0.17 $\pm$ 1.18	0.07 $\pm$ 0.82	0.17 $\pm$ 0.84	0.44 $\pm$ 2.04	0.14 $\pm$ 1.2	0.16 $\pm$ 1.48	0.4 $\pm$ 2.68	0.2 $\pm$ 1.13	0.6157
Offal	2.73 $\pm$ 4 *+	0.56 $\pm$ 1.98	0.71 $\pm$ 1.84	0.58 $\pm$ 1.48	0.69 $\pm$ 1.88	0.46 $\pm$ 2.23	0.35 $\pm$ 1.3 *-	0.53 $\pm$ 1.93	<.0001
Delicatessen	9.2 $\pm$ 6.06	7.91 $\pm$ 5.04 *-	9.26 $\pm$ 5.18 *+	9.3 $\pm$ 5.81 *+	8.33 $\pm$ 4.74	8.9 $\pm$ 6.22	8.02 $\pm$ 6.14	5.65 $\pm$ 4.38 *-	<.0001
Fish	6.95 $\pm$ 6.32	5.22 $\pm$ 5.54 *-	6.87 $\pm$ 6.08	9.58 $\pm$ 6.8 *+	5.77 $\pm$ 5.03 *-	6.26 $\pm$ 6.08	6.03 $\pm$ 5.59 *-	14.59 $\pm$ 8.47 *+	<.0001
Milk	3.71 $\pm$ 3.8 *-	3.62 $\pm$ 3.57 *-	4.69 $\pm$ 4.07 *-	3.65 $\pm$ 3.24 *-	15.04 $\pm$ 5.7 *+	6.23 $\pm$ 5.3	4.89 $\pm$ 4.61 *-	4.56 $\pm$ 2.98 *-	<.0001
Yogurts	3.3 $\pm$ 3.48 *-	3.48 $\pm$ 4.13	3.67 $\pm$ 3.11	5.12 $\pm$ 4.92 *+	4.44 $\pm$ 3.73	2.7 $\pm$ 3.48 *-	4.07 $\pm$ 4.64	6.16 $\pm$ 4.25 *+	<.0001
Cheese	8.25 $\pm$ 6.17 *-	7.92 $\pm$ 5.45 *-	9.4 $\pm$ 5.5 *-	13.27 $\pm$ 6.29 *+	8.61 $\pm$ 4.86 *-	13.54 $\pm$ 6.6 *+	7.85 $\pm$ 5.06 *-	6.72 $\pm$ 4.16 *-	<.0001
Other dairy	0.35 $\pm$ 0.31 *-	0.36 $\pm$ 0.3 *-	0.42 $\pm$ 0.3	0.48 $\pm$ 0.38	0.54 $\pm$ 0.37 *+	0.52 $\pm$ 0.5 *+	0.4 $\pm$ 0.35	0.47 $\pm$ 0.37	<.0001
Eggs	3.32 $\pm$ 2.14 *-	2.79 $\pm$ 2.15 *-	3.33 $\pm$ 2.29	4.27 $\pm$ 2.91 *+	4.16 $\pm$ 2.68	4.68 $\pm$ 3.2 *+	3.86 $\pm$ 2.95	3.16 $\pm$ 1.92 *-	<.0001
Plant	32.21 $\pm$ 7.74	27.21 $\pm$ 7.94 *-	28.97 $\pm$ 7.05 *-	33.78 $\pm$ 7.87 *+	28.97 $\pm$ 5.63 *-	33.64 $\pm$ 8.03 *+	30.36 $\pm$ 8.04	34.63 $\pm$ 10.52 *+	<.0001
Cereals	21.29 $\pm$ 6.85	18.34 $\pm$ 6.93 *-	19.49 $\pm$ 6.36 *-	22.22 $\pm$ 6.71 *+	18.81 $\pm$ 5.08 *-	23.15 $\pm$ 5.9 *+	20.98 $\pm$ 7.53	22 $\pm$ 8.26	<.0001
Potatoes	1.86 $\pm$ 1.25	1.66 $\pm$ 1.16 *-	1.85 $\pm$ 1.27	1.81 $\pm$ 1.18	1.79 $\pm$ 1.05	1.77 $\pm$ 1.24	1.99 $\pm$ 1.27	2.01 $\pm$ 1.31	0.0904
Fruit	1.97 $\pm$ 1.93	1.63 $\pm$ 1.4	1.58 $\pm$ 1.04 *-	2.29 $\pm$ 2.13 *+	1.73 $\pm$ 1.14	2 $\pm$ 2.07	1.72 $\pm$ 1.6	2.41 $\pm$ 1.6 *+	<.0001
Vegetables	2.83 $\pm$ 1.58	2.49 $\pm$ 1.55	2.69 $\pm$ 1.25	3.32 $\pm$ 1.52 *+	2.73 $\pm$ 1.31	2.38 $\pm$ 1.33 *-	2.51 $\pm$ 1.41 *-	3.7 $\pm$ 1.75 *+	<.0001
Nuts and seeds	1.05 $\pm$ 1.89	0.51 $\pm$ 1.01	0.73 $\pm$ 1.2	1 $\pm$ 1.41 *+	0.72 $\pm$ 1	0.89 $\pm$ 1.36	0.67 $\pm$ 1.3	1.12 $\pm$ 1.3	0.0345
Legumes	1.52 $\pm$ 1.96 *+	1.11 $\pm$ 1.92	1.03 $\pm$ 1.51	1.07 $\pm$ 1.6	0.84 $\pm$ 1.49	0.95 $\pm$ 2.34	0.82 $\pm$ 1.73 *-	1.21 $\pm$ 2.26	0.0302
Other	1.14 $\pm$ 0.87 *-	1.03 $\pm$ 0.84 *-	1.14 $\pm$ 0.69 *-	1.44 $\pm$ 0.89	1.78 $\pm$ 1.26 *+	1.7 $\pm$ 1.28 *+	1.25 $\pm$ 0.9 *-	1.39 $\pm$ 1.43	<.0001
Spices	0.54 $\pm$ 0.47	0.45 $\pm$ 0.33 *-	0.47 $\pm$ 0.35	0.62 $\pm$ 0.82	0.56 $\pm$ 0.51	0.79 $\pm$ 0.44 *+	0.44 $\pm$ 0.42 *-	0.79 $\pm$ 0.79 *+	<.0001

+/-, significantly higher or lower than the overall population mean; ProbF, p-value of the ANOVA testing the dietary effect on the probability of adequacy.

¹ Food groups after breaking down composite foods into ingredients using recipes

References

1. Perignon, M.; Barré, T.; Gazan, R.; Amiot, M.-J.; Darmon, N. The bioavailability of iron, zinc, protein and vitamin a is highly variable in French individual diets: Impact on nutrient inadequacy assessment and relation with the animal-to-plant ratio of diets. *Food Chem.*, In press.
2. Gibson, R.S.; Bailey, K.B.; Gibbs, M.; Ferguson, E.L. A review of phytate, iron, zinc, and calcium concentrations in plant-based complementary foods used in low-income countries and implications for bioavailability. *Food Nutr. Bull.* 2010, 31, S134-146.
3. Sarwar Gilani, G.; Wu Xiao, C.; Cockell, K.A. Impact of antinutritional factors in food proteins on the digestibility of protein and the bioavailability of amino acids and on protein quality. *Br. J. Nutr.* 2012, 108.
4. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for vitamin a. *EFSA Journal* 2015, 13, 4028.
5. Trumbo, P.; Yates, A.A.; Schlicker, S.; Poos, M. Dietary reference intakes: Vitamin a, vitamin k, arsenic, boron, chromium, copper, iodine, iron, manganese, molybdenum, nickel, silicon, vanadium, and zinc. *J. Am. Diet. Assoc.* 2001, 101, 294-301.
6. EFSA Panel on Dietetic Products, N.a.A.N. Scientific opinion on dietary reference values for calcium. *EFSA Journal* 2015, 13, 4101.
7. Miller, L.V.; Krebs, N.F.; Hambidge, K.M. A mathematical model of zinc absorption in humans as a function of dietary zinc and phytate. *J. Nutr.* 2007, 137, 135-141.
8. Armah, S.M.; Carriquiry, A.; Sullivan, D.; Cook, J.D.; Reddy, M.B. A complete diet-based algorithm for predicting nonheme iron absorption in adults. *J. Nutr.* 2013, 143, 1136-1140.
9. Hallberg, L.; Hulthen, L. Prediction of dietary iron absorption: An algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. *Am. J. Clin. Nutr.* 2000, 71, 1147-1160.
10. FAO Expert Consultation. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. *FAO Food Nutr. Pap.* 2011, 92.
11. Tome, D. Digestibility issues of vegetable versus animal proteins: Protein and amino acid requirements--functional aspects. *Food Nutr. Bull.* 2013, 34, 272-274.
12. Oberli, M.; Marsset-Baglieri, A.; Airinei, G.; Sante-Lhoutellier, V.; Khodorova, N.; Remond, D.; Foucault-Simonin, A.; Piedcoq, J.; Tome, D.; Fromentin, G., et al. High true ileal digestibility but not postprandial utilization of nitrogen from bovine meat protein in humans is moderately decreased by high-temperature, long-duration cooking. *J. Nutr.* 2015, 145, 2221-2228.
13. Dietary Guidelines Advisory Committee. Report of the dietary guidelines advisory committee on the dietary guidelines for americans, 2010, to the secretary of agriculture and the secretary of health and human services; Washington DC, 2010.

14. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA),. Scientific opinion on dietary reference values for thiamin. EFSA journal 2016, 14, 4653.
15. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA),. Scientific opinion on dietary reference values for vitamin b6. EFSA Journal 2016, 14, e04485-n/a.
16. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA),. Scientific opinion on dietary references values for phosphorus. EFSA journal 2015, 13, 4185.

2.3. Travail personnel n°3 : Les attitudes et croyances vis-à-vis des sources de protéines sont un bon prédicteur du degré de transition vers un régime pauvre en viande en France

Résumé

Contexte : La consommation de viande est en baisse dans les pays occidentaux et, si la proportion de végétariens stricts reste faible, les régimes intermédiaires tels que le flexitarisme se sont développés ces dernières années.

Objectifs : Nos objectifs étaient d'identifier les différents niveaux de transition vers des régimes à faible teneur en viande, de caractériser en quoi ces régimes alimentaires diffèrent en termes d'apport alimentaire et de déterminer si les attitudes et les croyances peuvent expliquer ces degrés de transition.

Méthode : Dans une enquête représentative de la population adulte française menée en 2018 ($n = 2\,055$), les participants ont déclaré s'ils suivaient un régime alimentaire particulier et ont rempli un fréquentiel alimentaire concernant 29 groupes d'aliments protéiques et un questionnaire sur leurs attitudes et croyances concernant les sources de protéines. Nous avons identifié quatre types de régime à partir de ces données déclaratives : végétariens, flexitariens, pro-flexitariens et omnivores. La théorie du comportement planifié a été utilisée pour prédire la consommation de viande et les intentions de réduire la consommation de viande.

Résultats : L'échantillon comprenait 2,5 % de végétariens, 6,3 % de flexitariens, 18,2 % de pro-flexitariens et 72,9 % d'omnivores. Les types de régime présentaient des profils alimentaires et des scores attitudinaux spécifiques. Comparés aux omnivores, les pro-flexitariens consommaient moins de bœuf et de porc, plus de légumes et de légumineuses et admettaient beaucoup plus les impacts environnementaux de la viande. Comparés aux pro-flexitariens, les flexitariens consommaient moins de viande rouge et de viande transformée et admettaient plus les effets négatifs de la viande sur la santé. Enfin, comparés aux flexitariens, les végétariens ne consommaient presque pas de viande, mais beaucoup plus de légumineuses, de noix et de graines, et étaient beaucoup plus sensibles aux questions de bien-être animal. Les attitudes, les normes sociales et l'auto-efficacité perçue prédisaient les intentions de réduire la consommation de viande, et l'attitude était le meilleur prédicteur. Les intentions et l'auto-efficacité prédisaient la consommation de viande.

Conclusion : Les attitudes et les croyances liées à la viande sont associées au degré de transition vers des régimes à faible teneur en viande.

Valorisation : Ce travail a été soumis à la revue *Appetite* le 04 mars 2019.

Messages-clés

- Les individus la population française ont déclaré suivre différents types de régimes : végétariens, flexitariens et omnivores. Au sein des omnivores, nous avons considéré que les individus envisageant fortement de suivre un régime flexitarien à l'avenir étaient « pro-flexitariens ».
- Les différents types de régimes se différenciaient les uns des autres par leurs consommations de viande et de protéines végétales, et par leurs attitudes et croyances vis-à-vis de la viande et de ses impacts sur l'environnement, la santé et le bien-être animal.
- La théorie du comportement planifié permettait de prédire l'intention de diminuer la consommation de viande, et dans une moindre mesure la consommation de viande.

Self-declared attitudes and beliefs regarding protein sources are a good prediction of the degree of transition to a low-meat diet in France

Erwan de Gavelle^a, Olga Davidenko^a, H     Fouillet^a, Julien Delarue^b, Nicolas Darcel^a, Jean-François Huneau^a, François Mariotti^{a,*}

^a UMR PNCA, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay,

^b UMR GENIAL, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay

* corresponding author, francois.mariotti@agroparistech.fr, 16 rue Claude Bernard,
75005 Paris, France

Abstract

Meat consumption in Western countries is declining and, while the proportion of strict vegetarians remains low, intermediate diets such as flexitarianism have been developing in recent years. Our objectives were to identify the different levels of transition towards low-meat diets, characterize how these diets differ in terms of food intake, and identify whether attitudes and beliefs can explain these degrees of transition. In a representative survey of the French adult population conducted in 2018 (n=2,055), participants declared whether they followed a particular diet and completed a food frequency questionnaire on 29 food sources of protein and a questionnaire on their attitudes and beliefs regarding protein sources. We identified four dietary types based on these declarative data: vegetarians, flexitarians, pro-flexitarians and omnivores. The theory of planned behavior was used to predict meat intake and intentions to reduce meat intake. The sample contained 2.5% vegetarians, 6.3% flexitarians, 18.2% pro-flexitarians and 72.9% omnivores. The diet groups displayed specific dietary profiles and attitudinal scores. Compared with omnivores, pro-flexitarians consumed less beef and pork, more vegetables and legumes and were much more in agreement about the environmental impacts of meat. Compared with pro-flexitarians, flexitarians consumed less red and processed meat, and agreed much more about the health impacts of meat. Finally, versus flexitarians, vegetarians consumed almost no meat but far more legumes, nuts and seeds, and were much more sensitive to animal welfare issues. Attitudes, social norms and perceived behavioral control (PBC) predicted intentions to reduce meat consumption but attitude was the most important predictor. Intentions and PBC were both predictive of meat consumption. Attitudes and beliefs related to meat were associated with the degree of transition towards low-meat diets.

Keywords

Attitudes; dietary transition; protein sources; flexitarian; vegetarian;

Introduction

When compared to plant protein, an intake of animal protein, and particularly that of meat, has been associated with sustainability issues (Godfray, et al., 2018) such as animal welfare, higher risks of non-communicable diseases (colorectal cancer and cardiovascular diseases) (Anses, 2016a; Norat, et al., 2005) and a more negative impact on the environment and climate change (Cleveland & Gee, 2017; Gerber, et al., 2013). In parallel with increasing awareness to sustainability issues in Western countries, there had been a decline in total per capita meat consumption since the early 2000s in France (-9% between 2000 and 2015) (FranceAgriMer, 2015) and more generally in Southern Europe (-9% between 2000 and 2013), Western Europe (-4%) and North America (-6%). This trend has involved a rearrangement of meat intake, consisting in a lower consumption of pork and beef and a higher consumption of poultry meat (FAO, 2018).

The motivations, levers and barriers attached to reducing meat intake, as well as attitudes and beliefs related to meat, have been widely studied in the recent literature. The principal motivations behind a lower meat intake are related to attitudes and beliefs regarding its impact on health, animal welfare and, to a lesser extent, the environment (Clonan, Wilson, Swift, Leibovici, & Holdsworth, 2015; De Backer & Hudders, 2015; Latvala, et al., 2012; Zur & A. Klöckner, 2014). It appears that the motivations behind reducing meat are age-dependent, inasmuch as young adults tend to lower their consumption for animal welfare and environmental reasons, whereas health-related reasons prevail among older generations (Pribis, Pencak, & Grajales, 2010). Furthermore, motivations also differ depending on the level of meat intake: it has been reported that individuals who reduce their meat intake for health reasons do not exclude meat altogether, while those concerned by animal welfare tend to stop eating meat abruptly and are more likely to become vegans (de Boer, Schösler, & Aiking, 2017; Petti, Palmieri, Vadalà, & Laurino, 2017). The main barriers identified in the literature are food habits and a lack of skills to prepare meatless dishes (Pohjolainen, Vinnari, & Jokinen, 2015; Schösler, de Boer, & Boersema, 2012), an attachment to meat (Graça, Oliveira, & Calheiros, 2015), or social norms (Amiot, El Hajj Boutros, Sukhanova, & Karelis, 2018). Psychological theories such as the Theory of Planned Behavior (TPB) have been used to predict health-related behaviors and notably meat intake, and have been shown to partially predict a transition to plant-based diets

(Wyker & Davison, 2010) or lower levels of meat intake (Zur & A. Klöckner, 2014) in non-representative populations in the USA and Norway.

Important gaps remain in our understanding of the individual determinants that underpin changes to meat intake in Western populations, for three reasons. First, the literature has failed to reveal the complexity of the relationship between attitudes and beliefs regarding particular foods and the type of diet type adopted, whether this is actual or intended. Second, dietary transitions during the past few years appear to have been characterized by the emergence of moderate and low-meat diets which can constitute a gradient from omnivorous to vegetarian diets, although data on this gradient are scarce. Lastly, most of the aforementioned studies were conducted in Northern Europe or the UK, which have much higher numbers of vegetarians and are characterized by dietary habits that contrast with those in other Western countries such as France (Halkjaer, et al., 2009). The proportion of vegetarians remains low among the French (around 2%) (Anses, 2017) who declare more negative attitudes towards vegetarianism compared to other countries (Ruby, et al., 2016). However, a recent survey reported that intermediate profiles of transition towards a lower meat intake have grown very rapidly in the recent years in France (the proportion of households with at least one person who is “neither vegetarian nor vegan, but tends to reduce or limit their animal protein intake” rose from 24% in 2015 to 34% in 2017) (Kantar WorldPanel, 2017). It therefore seems important to study the transition towards low-meat diets in France as an example of a country with a relatively weak acceptance of vegetarian diets but which has evolved very rapidly during the past few years.

Our objectives were therefore to identify different dietary types which might constitute grades of transition to low-meat diets, to characterize how these diets differ in terms of protein source intakes, and determine whether attitudes and beliefs might explain these dietary types.

Population and methods

Population and food intake

Data were collected between April 9 and May 24, 2018 using an online questionnaire directed to members of a consumer panel representative of 18 to 65-year-old Internet users in France. A total of 2,692 individuals (1,408 women and 1,284 men) completed the entire questionnaire.

The questionnaire contained questions on food habits related to the dietary sources of protein consumed by the individuals (including if they followed a vegetarian or vegan diet) (Food intakes), their attitudes and beliefs relative to meat, their intentions to reduce meat consumption (Attitudes and beliefs related to protein sources) and their socio-demographic background (Sociodemographic and lifestyle factors). Three questions were asked concerning the hunger, fullness and prospective consumption of participants, as recommended by Blundell et al. (Blundell, et al., 2010), and aggregated into an appetite score.

Food intakes

To limit the time required to answer the questionnaire, it only included 29 food groups. They were selected to cover 84% of the total protein intake of the French population in 2006-2007, as described in a previous study (de Gavelle, Huneau, Fouillet, & Mariotti, 2018). Participants were asked to declare their overall meat consumption, and then their consumption of specific meats and other food groups as sources of protein. The food groups are described in Supplemental Table 1. Intake frequencies were rated on a 9-item scale ranging from “never” to “>3 times/day”. In the second part of the questionnaire, the individuals were asked to state their usual portion size on a 7-item scale using standard pictures from the SU-VI-MAX picture booklet (Le Moullec, et al., 1996). To limit the time required to answer, usual portions of only 20 protein food groups were assessed. The food groups were the 10 groups whose portions were increased the most frequently and the 10 groups whose portions were decreased the most frequently in order to increase nutrient adequacy, as described in the previous study (de Gavelle, et al., 2018). If an individual did not consume n protein foods from the first 10 food groups, he/she was asked about portions of the $n+10$ th of the list. Thus each individual did not report portions for all food groups, and the mean portion size

(for men and women, separately) of the food group was imputed to the food portions that were not reported. For each participant, daily mean intakes (in grams) were then calculated per food group by multiplying the consumption frequency by the portion size. Finally, a partial estimate of individual protein intake was made. The contributions of different food groups to protein intake were estimated as weighted means of protein content of the foods included in each food group, weighted by the mean intake of each food, as reported in the second French national study on food consumption (INCA2) (Dubuisson, et al., 2010). These contributions were then multiplied by the daily mean intakes of each group to calculate the partial estimate of protein intake.

We identified misreports using a 3-step method. Consistency was verified by asking four questions on portion size twice in different parts of the questionnaire. A participant was excluded if he/she declared different portion sizes of the same food more than once (n=195). The plausibility of the declared frequencies was then tested. If the sum of the declared intake frequencies was <once/day or >20 times/day (2.5th and 97.5th percentiles of intake frequency of the protein foods in the INCA2 population (as estimated from the dataset), respectively), the participant was excluded (n=61). Finally, the plausibility of intakes was tested using the mean intakes reported in the French 2014-2015 INCA3 study (Anses, 2017). Given that intakes followed a lognormal distribution, if the logarithm of the sum of intakes declared (/kg body weight) was not between mean + 2 SD and mean – 2 SD, or if the intake of one food group was higher than the mean intake + 3 SD of this food group in, the participant was excluded. However, an exception was applied for self-declared vegetarians or vegans, who had no upper limit for their intake of legumes, nuts and seeds, but they were excluded if they declared a meat intake higher than 70g/d (the highest level recommended by ANSES (Anses, 2016a)). After excluding all the misreports (n=381), we obtained a final sample of 2,055 individuals (905 men and 1,055 women). The flowchart is detailed in Supplemental Figure 1.

Attitudes and beliefs relative to protein sources

Participants completed a 15-item questionnaire concerning their assumptions about meat or plant protein. The choice of items was based on publications on the same topic (Clonan, et al., 2015; Graça, Calheiros, & Oliveira, 2015; Jallinoja, Niva, & Latvala, 2016; Pohjolainen, et al., 2015; Zur & A. Klöckner, 2014) and covering the main themes

identified (intention or perceived behavioral control regarding reduced meat consumption, attitudes towards environmental, health or animal welfare issues, social norms or attachment to meat) (Table 1). Participants were asked to rate their agreement with each item on a 7-point Likert scale, ranging from “do not agree at all” to “fully agree”. We chose to reverse the rating of four questions (from 7 to 1), as these concerned positive attitudes towards meat, while all the others focused on negative attitudes. The reverse-coded questions were marked with “(-)”.

A model based on the Theory of Planned Behavior (TPB) was adapted from the work by Godin et al. (Godin & Kok, 1996) to explain intentions to reduce meat consumption and related behavior, i.e. meat intake. The model was implemented by assigning the assumptions to four categories: intention, attitude, subjective norm and perceived behavioral control (PBC). The score for each category was the mean score of the assumptions included in the category. According to the TPB, intention is explained by attitude, subjective norms and PBC, and behavior (in this case, meat intake) is explained by intention and PBC. The internal consistency of the constructs was assessed using Cronbach’s alpha (Table 1). We chose not to include items relative to the price of meat as this was not linked to any of the factors. Likewise, the item “I would be able to reduce my meat consumption if my doctor recommended it to me” (DOC) was considered separately, as had been the case in a previous TPB model on the adoption of plant-based diets (Wyker & Davison, 2010).

Table 1. Questionnaire items on attitudes and beliefs, classified as intentions or factors explaining intentions (variables), and internal consistency¹.

Assumption	Abbreviation	Variables	Cronbach’s alpha
I intend to reduce my meat consumption in the coming months	INT	Intention	0.73
I am considering eating meat and fish only very rarely (no more than once a week)	FLEX		
I feel able to reduce my meat consumption in the coming months	ABLE	Perceived behavioral control	0.70
It is harder to prepare good vegetarian foods than meat ones (-)	HAB		
A full meal is a meal with meat (-)	HAB2		
I choose food which has been produced in a way that minimizes cruelty to animals	WELF	Attitude	0.73
I don’t really think much about the animal when I buy meat (-)	WELF2		
To help reduce the impact of climate change, it is better to eat less animal foods (meat, dairy products and eggs)	ENV		
Substituting beans for meat slows down climate change	ENV2		
Meat is a nutritionally necessary component for humans (-)	HEAL		
Consuming high amounts of meat might cause serious health problems	HEAL2	Subjective norms	0.69
People around me often say that reducing your meat consumption is better for your health	NORM		
There are more and more people around me who are reducing their meat consumption	NORM2		
I would be able to reduce my meat consumption if my doctor recommended it to me	DOC	-	-
Eating meat at every meal is expensive	PRICE	-	-

¹ Items were rated on a 7-item Likert scale, ranging from “do not agree at all” to “fully agree”. (-) indicates reverse-coded items.

Identification and characterization of dietary types

We separated our sample into four groups according to the diet followed by the participants. Several criteria were applied to assign dietary types: first, they were identified using self-declaration. Participants who declared they were “vegetarians” and/or “vegans” were considered as “vegetarians” (because only nine participants were vegan). Those who stated they were “flexitarians (limiting meat consumption to a minimum)” and had not already been classified as vegetarians were considered to be “flexitarians”. Those who rated the question “I am considering eating meat and fish only very rarely (no more than once a week)” at ≥ 5 and were not flexitarians or vegetarians were considered to be “pro-flexitarians”. All other participants in the sample were considered to be regular meat/fish eaters and were referred to as “omnivores”.

Socio-demographic and lifestyle factors

The participants were asked about their sex, age, level of education, socio-professional category, household composition, height and weight, income, place of residence zip code and whether they were responsible for grocery shopping in the household. Body Mass Index (BMI) (in kg/m²) was computed as the ratio of weight to squared height and classified according to WHO guidelines (WHO, 2000). The categories used for monthly income were as follows: <€1,500, €1,500–2,500, €2,500–3,400 and >€3,400 per household. The zip codes reported provided information on the size of the local community: <2,000 inhabitants, 2,000-20,000 inhabitants, 20,000-100,000 inhabitants and Paris conurbation.

Statistical analyses

An overall α level of 5% was used for statistical tests. Sample weightings were applied to ensure the representativeness of the sample with respect to sex, age, socio-professional category and geographic area of living, using the Icarus R package. All means were thus weighted in this way. ANCOVA adjusted for age, sex and appetite scores was used to test for differences depending on the overall type of diet, and post-hoc tests with Tukey correction for differences between the diets. Multivariate logistic regression models were implemented to assess the association between sociodemographic factors and the type of diet, using omnivores as the reference.

Structural equation modelling (SEM) with the lavaan R package was used to test the

TPB model, which was evaluated by examining the comparative fit index (CFI), the Tucker-Lewis index (TLI), the root-mean-square-error of approximation (RMSEA) and χ^2 divided by degrees of freedom (χ^2/df). A good model fit was indicated by a high CFI or TLI (>0.90), a low RMSEA (<0.10) and χ^2/df between 1 and 3 (Kline, 2015). When not stated otherwise, all analyses were performed using SAS 9.1.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Results

After the misreports had been excluded, the study sample ($n=2,055$) contained 52 self-declared vegetarians (2.5%, considering the survey weightings), 129 self-declared flexitarians (6.3%), 381 pro-flexitarians (18.2%) and 1,493 omnivores (72.9%). In the overall population, the mean meat intake (as declared for “overall meat”) was 83.4 (± 85.9) g/d, the mean partial food intake was 708.9 (± 343.1) g/d and the mean partial protein intake was 74.2 (± 38.5) g/d.

Intakes of different protein food groups

The mean partial food intake was 732.1 (± 335.1) g/d for omnivores, 689.8 (± 371.5) for pro-flexitarians, 543.8 (± 282.3) for flexitarians and 612.6 (± 347.3) g/d for vegetarians (**Figure 1**). The declared mean overall meat intake was 98.6 (± 91.7) g/d for omnivores, 54.5 (± 51.4) for pro-flexitarians, 26.5 (± 32.3) for flexitarians and 6.2 (± 6.6) for vegetarians. Meat intake differed ($P < 0.01$) between each dietary type except between flexitarians and vegetarians. The mean partial protein intake was 77.7 (± 37.5) g/d for omnivores, 70.7 (± 41.3) g/d for pro-flexitarians, 51.1 (± 29.0) g/d for flexitarians and 51.1 (± 30.7) g/d for vegetarians. The mean partial protein intake differed between each dietary type ($P < 0.01$), except between flexitarians and vegetarians.

Omnivores and pro-flexitarians differed the most ($>20\%$) regarding their intakes of beef (-28%, i.e. 28% lower among the latter than the former; $P < 0.0001$), pork (-26%, $P < 0.001$), bread (-22%, $P < 0.01$), spinach and chard (+38%, $P < 0.05$) and legumes (+30%, $P < 0.01$). Pro-flexitarians and flexitarians differed in terms of their intakes of pâté (-70%, $P < 0.05$), beef (-67%, $P < 0.0001$), veal and lamb (-66%, $P < 0.01$), sausages (-59%, $P < 0.05$) and ham (-58%, $P < 0.0001$). Finally, flexitarians and vegetarians had different intakes of poultry (-86%, $P < 0.05$), nuts and seeds (+226%, $P < 0.0001$), legumes (+143%, $P < 0.0001$) and pasta (+46%, $P < 0.05$).

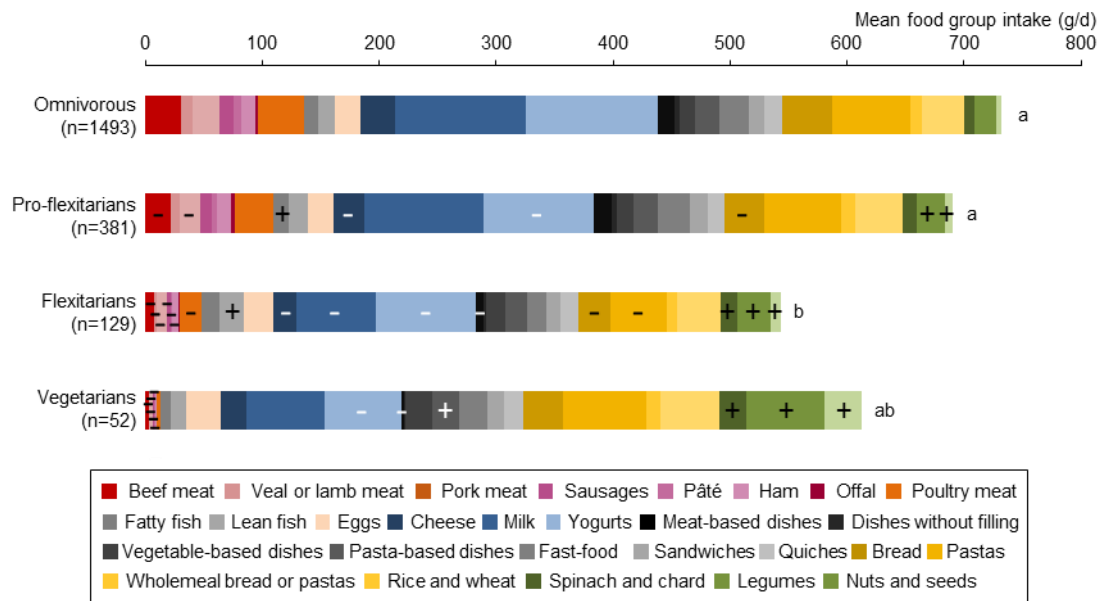


Figure 1. Mean intakes of different food groups in each dietary type determined in the questionnaire sample (2018, $n=2,055$). +/-: mean intake significantly higher or lower than omnivores, as tested using post-hoc pairwise comparisons with Tukey corrections. Labeled means without a common letter indicate a significant difference in total food group intake between the diet groups, as tested using post-hoc pairwise comparisons with Tukey corrections.

Differences in mean intakes between the diets were mostly explained by differences in the frequency of consumption. Indeed, the portion sizes declared were similar between the different dietary type, except for beef, which was consumed in larger portions by omnivores versus pro-flexitarians ($P < 0.01$) and flexitarians ($P < 0.0001$), and in larger portions by pro-flexitarians compared to flexitarians ($P < 0.05$), and poultry and pasta, which were consumed in larger portions by omnivores compared to flexitarians ($P < 0.05$).

Sociodemographic characteristics

According to the results of logistic regression, pro-flexitarians were more likely to be women, older and to have a lower income than omnivores. Flexitarians were less likely to be overweight and more likely to belong to lower income groups than omnivores. Vegetarians were more likely to be women, less likely to be overweight or obese and more likely than omnivores to be single or in a couple without children (**Table 2**). Likewise, when the reference of the logistic regression was pro-flexitarians, flexitarians were more likely to be 25-34 years-old and single, and vegetarians were less likely to

be obese and more likely to be single or in a couple without children. Finally, compared to flexitarians, vegetarians were more likely to be women and middle-income earners (€1501-3400), and less likely to be in a couple with children.

Table 2. Sociodemographic characteristics of the different dietary types compared to omnivores in the questionnaire sample (2018, $n=2,055$). Associations were tested using multivariate logistic regression models.

Variables	Omnivores ($n=1,493$)	Pro- flexitarians ($n=381$)	Flexitarians ($n=129$)	Vegetarians ($n=52$)	Pro- flexitarians vs Meat-eaters	Flexitarians vs Meat-eaters	Vegetarians vs Meat-eaters	P^1
	%	%	%	%	OR [95% CI]	OR [95% CI]	OR [95% CI]	
Sex								<.0001
Female	50.0	63.5	58.9	76.9	1.7 [1.34;2.17]	1.28 [0.87;1.88]	3.16 [1.61;6.22]	
Male	50.0	36.5	41.1	23.1	1	1	1	
Age (years)								0.021
18-24	12.6	12.6	14.7	26.9	0.61 [0.40;0.92]	0.73 [0.38;1.40]	1.41 [0.60;3.32]	
25-34	20.0	14.7	22.5	19.2	0.53 [0.36;0.76]	1.03 [0.59;1.81]	0.93 [0.38;2.27]	
35-44	22.0	17.3	20.9	11.5	0.61 [0.43;0.88]	1.04 [0.58;1.87]	0.79 [0.28;2.27]	
45-54	23.3	27.0	20.9	21.2	0.95 [0.68;1.32]	1.03 [0.58;1.84]	1.61 [0.66;3.97]	
55-65	22.1	28.4	20.9	21.2	1	1	1	
BMI (kg/m²)								0.036
< 18.5	4.2	5.3	7.75	3.9	1.11 [0.65;1.89]	1.31 [0.64;2.69]	0.48 [0.11;2.04]	
18.5-25	51.3	53.0	62.8	76.9	1	1	1	
25-30	30.7	28.6	20.9	17.3	0.92 [0.70;1.20]	0.60 [0.38;0.96]	0.45 [0.21;0.94]	
≥ 30	13.8	13.1	8.5	1.9	0.86 [0.60;1.22]	0.53 [0.27;1.02]	0.09 [0.01;0.70]	
Income (€ / month / household)								0.003
≤ 1500	18.3	25.7	33.3	26.9	1	1	1	
1501-2500	29.2	30.7	22.5	40.4	0.74 [0.54;1.03]	0.47 [0.28;0.79]	1.30 [0.62;2.73]	
2501-3400	26.5	21.8	17.8	11.5	0.56 [0.39;0.81]	0.46 [0.25;0.83]	0.44 [0.16;1.26]	
>3400	26.0	21.8	26.4	21.2	0.58 [0.39;0.85]	0.70 [0.40;1.24]	0.97 [0.39;2.44]	
Household composition								0.023
2 adults living as a couple with at least 1 child	44.3	42.5	31.8	17.3	1	1	1	
2 adults living as a couple without children	27.3	26.5	27.9	42.3	0.96 [0.71;1.30]	1.48 [0.9;2.44]	3.95 [1.68;9.28]	
Alone	28.5	31.0	40.3	40.4	0.89 [0.65;1.23]	1.64 [0.97;2.76]	2.54 [1.03;6.24]	

¹ Odds ratios (95% CI) from the multivariate model included sex, age, BMI, household income and household composition. OR: Odds ratio; CI: Confidence interval

Attitudes and beliefs relative to sources of protein

Attitudes and beliefs relative to protein sources were associated with different dietary types. Omnivores had lower mean scores than the three other dietary types for each assumption. Pro-flexitarians had lower scores than flexitarians and vegetarians for each assumption except for those concerning subjective norms (HAB and HAB2), an ability to reduce meat consumption if advised by a doctor (DOC) and price (PRICE), which did not differ between pro-flexitarians and flexitarians or vegetarians. The most marked differences (>30%) between pro-flexitarians and omnivores were the estimates of intent (INT +62%) and ability (ABLE +42%) to reduce meat intake, and concerns regarding the environment (ENV +39% and ENV2 +38%) and animal welfare (WELF +36%). The most marked differences (>15%) between flexitarians and pro-flexitarians were habits of consuming meatless dishes (HAB +26%), beliefs about the

link between meat and health (HEALTH2 + 25%) and concern for animal welfare (WELF2 +22%), which were the same as for flexitarians and vegetarians (HEALTH2 +35%, HAB2 +27% and WELF2 +17%) (**Figure 2**).

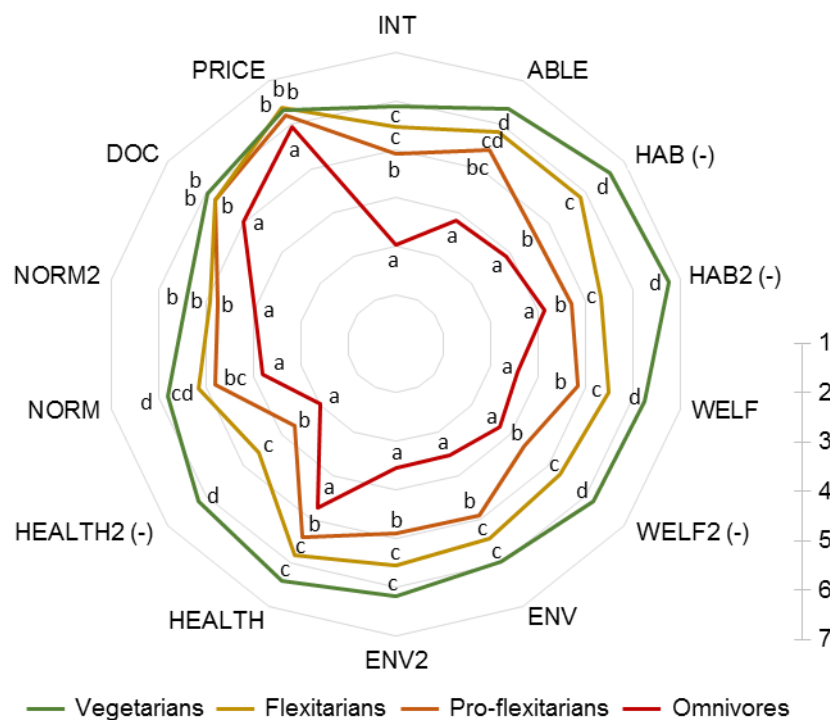


Figure 2. Mean scores (from 1 to 7) for items in the attitudes and beliefs questionnaire, for each dietary type in the sample (2018, $n=2,055$). When ANCOVA was adjusted for age, sex and appetite score and identified a significant effect of the type of diet, labeled means without a common letter indicate a significant difference between the dietary types, as tested by pairwise post hoc comparisons with Tukey corrections ($P < 0.05$). Scores were reverse-coded for the items marked (-). ABLE, I feel able to reduce my meat consumption in the coming months; DOC, I would be able to reduce my meat consumption if my doctor recommended it to me; ENV, To help reduce the impact of climate change, it is better to eat less animal foods (meat, dairy products and eggs); ENV2, Substituting beans for meat slows down climate change; HAB, It is harder to prepare good vegetarian foods than meat ones; HAB2, A full meal is a meal with meat; HEALTH, Consuming high amounts of meat might cause serious health problems; HEALTH2, Meat is a nutritionally necessary component for humans; INT, I intend to reduce my meat consumption in the coming months; NORM, People around me often say that reducing your meat consumption is better for your health; NORM2, There are more and more people around me who are reducing their meat consumption; PRICE, Eating meat at every meal is expensive; WELF, I choose food which has been

produced in a way that minimizes cruelty to animals; WELF2, I don't really think much about the animal when I buy meat.

As for structural equation modelling, fit indices (CFI=0.999, TLI=0.997, RMSEA=0.021 and $\chi^2/df=1.89$) indicated that the TPB model procured a good fit to the data. Attitudes, subjective norms and PBC explained 51% of the variance of intention ($R^2=0.51$). Each variable was significantly associated with intention ($P < 0.0001$). The most important predictors of intention were attitude ($\beta=0.61$, which meant that +1 point of attitude led to +0.61 points of intention), PBC ($\beta=0.32$) and subjective norms ($\beta=0.15$). Attitude and subjective norms were not associated with meat intake, and only intention and PBC explained individual meat intake ($P < 0.0001$ for both). These variables explained 15% of the variance of meat intake ($R^2=0.15$). PBC was a better predictor ($\beta=-14.1$, which meant that +1 point of PBC led to -14.1 g/d of meat intake) than intention ($\beta=-9.0$) (Figure 3).

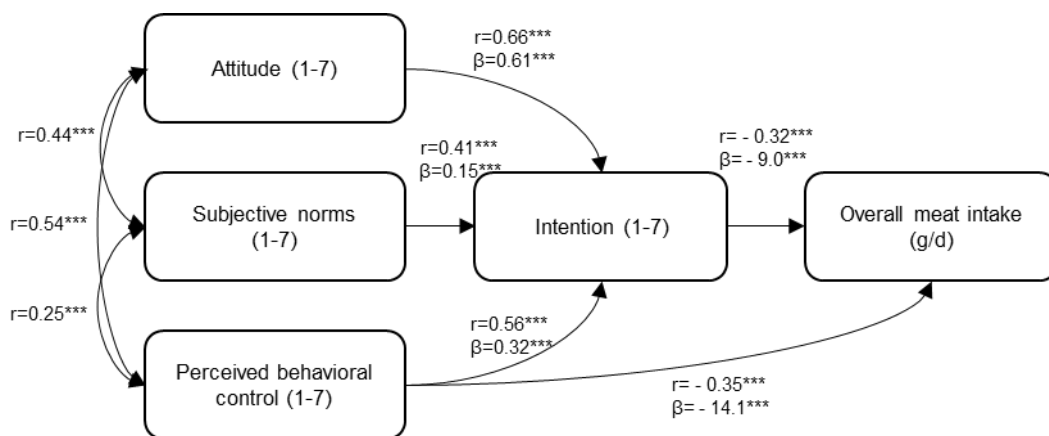


Figure 3. Measurement model for the Theory of Planned Behavior applied to the intention to reduce meat and meat intake in the questionnaire sample (2018, $n=2,055$). r , Pearson correlation coefficient; β , path coefficients; ***, $P < 0.0001$

Discussion

During this study on a large sample representative of the French adult population we were able to classify participants in four types whose diets related to different grades of transition from a traditional Western diet towards a lower meat intake: omnivores, pro-flexitarians, flexitarians and vegetarians. Among these dietary types, a gradual reduction of meat intake (particularly beef and pork) was associated with a compensatory gradual increase in that of vegetables, legumes, nuts and seeds. Differences in food intake were associated with differences in attitudes, subjective norms, PBC and intention to reduce meat consumption. One major finding of this study is that, beyond these dietary types, an intention to reduce meat could be predicted from beliefs and attitude more than from other factors in the TPB model, and that meat intake could be predicted from intention and PBC. The second important finding is that specific attitudes regarding the impact of meat on the environment, human health and animal welfare were strong determinants of these dietary types.

There seemed to be a gradation of dietary types from omnivores to vegetarians, but this should not be understood as a necessary transition that would ultimately lead to an all-vegetarian population in the future. Rather, this gradation should be seen as a picture of the different dietary types related to animal protein intake in France in 2018. Latvala et al. identified clusters of consumers depending on whether they were undergoing a transition, had already lived a transition or did not plan to change their behavior (Latvala, et al., 2012). The cluster of “past change” still consumed meat, but at lower levels than initially, and there were four different clusters of participants “ongoing a change”, depending on which food they intended to eat more in the future (chicken, beef or vegetables), showing that there was not a single trajectory of change that every individual followed. In our study, even though omnivores had lower scores than pro-flexitarians and pro-flexitarians had lower scores than flexitarians for almost every attitude, the magnitude of the contrasts between each stage was not the same. The main dietary differences between omnivores and pro-flexitarians were lower beef and pork intakes and higher vegetable and legume intakes. Latvala et al. also identified that most of the individuals living a transition towards less meat intake were primarily reducing their beef and pork intakes, but not that of poultry (Latvala, et al., 2012). The principal attitudinal differences between omnivores and pro-flexitarians were higher scores on environment-related attitudes, and a higher evaluation of their ability to

reduce meat consumption, thus reflecting their intention (according to the TPB model). In view of the literature and our results, we could therefore hypothesize that the first steps in the transition are operated by a raising awareness to the environmental impacts of meat consumption (because beef is the major contributor to food-related GHG emissions (Gerber, et al., 2013)) among individuals with a higher self-declared ability to reduce meat intake.

The principal differences between pro-flexitarians and flexitarians were a lower intake of beef and deli meat, a more pronounced habit of consuming meatless dishes and higher scores for health and animal welfare attitudes. The contrast between these two dietary types therefore appeared to be explained mainly by better habits to eat meatless dishes, animal welfare motivations and health-related motivations, as high intakes of red and processed meats are recognized as increasing the risk of colorectal cancer and cardiovascular diseases (Anses, 2016a; Boutron-Ruault, Mesrine, & Pierre, 2017). Finally, the contrast between flexitarians and vegetarians was marked by a lower poultry intake, and a higher intake of vegetables, legumes, nuts and seeds, with higher health and animal welfare-related attitudes and better habits. The question on meat being a necessary food for humans was the most discriminating, which may not appear surprising given that vegetarians evict meat. The differences between flexitarians and vegetarians could be linked to the ethical vegetarians who focus on moral considerations related to animal welfare, and tend to associate meat with disgust and emotional distress (Petti, et al., 2017). The differences in reasons depending on the stage of transition were consistent with findings from a few previous studies where omnivores tended to have lower scores for attitudes related to animal welfare than flexitarians, who in turn had lower scores for attitudes related to animal welfare than vegetarians (Clonan, et al., 2015; De Backer & Hudders, 2015). Among young native Dutch adults, and as in our study, animal welfare was the main reason to reduce meat consumption among vegetarians, while for low-meat eaters (who were similar to the flexitarians in our study) it was health, and for medium meat-eaters (who were similar to the pro-flexitarians in our study) it was the environment (de Boer, et al., 2017).

When TPB was applied to predict meat intake during two studies in the USA and Norway, Wyker et al. found that attitudes, PBC and subjective norms could predict intentions to follow a plant-based diet ($R^2=0.61$), and, as in our study, attitudes were the most important predictor (Wyker & Davison, 2010). Zur et al. used a modified model

based on TPB, norm activation theory and the protection motivation theory, and showed that attitude was the most important predictor of intention, but found no significant association between PBC and intention or meat consumption. They showed that meat consumption was well predicted by intention (Zur & A. Klöckner, 2014). Finally, Weibel et al. used the TPB in Switzerland to assess the associations between attitudes, social norms and PBC and the stage model of behavioral change towards a plant-based diet. They identified that attitudes (which they separated into “attitude” and “awareness”), PBC, and social norms, among other factors, were associated with the stage of behavioral change ($R^2=0.58$), and in particular with the shift from individuals who did not wish to change to individuals who had the intention to change (Weibel, Ohnmacht, Schaffner, & Kossmann, 2019). The TPB hypothesizes that attitudes and PBC predict intention which, in turn, predicts behavior. However, other theories hypothesize a reverse causation: individuals who are used to eating large amounts of meat cannot form attitudes and beliefs under which meat is deleterious to health, the environment or animal welfare as this would constitute a major dissonance with their behavior, so that they adapt their attitudes, PBC and intentions in order to limit the gap with their behavior (Rothgerber, 2017). A majority of omnivores see their behavior as the norm and do not look for or reject dissonant information regarding the impacts of meat consumption (Piazza, et al., 2015).

Some self-declared vegetarians did report meat consumption, and we chose not to exclude them for as long as this was not high (83% of vegetarians declared no meat intake, and only one vegetarian declared $\geq 10\text{g/d}$). This had also been the case in other studies (Allès, et al., 2017; Rothgerber, 2017), and our study was designed to question subjective representations by individuals of their diets, rather than their objective diets, and we saw that these representations were strongly associated with food intakes, attitudes and beliefs. The proportion of vegetarians in our study was consistent with the most recent French data (2% in 2014-2015) (Anses, 2017). The same food intake trends were reported in France by the Nutrinet-Santé study and in the UK by the Biobank cohort: vegetarians ate more vegetables, legumes and nuts, fewer dairy products and virtually no meat, compared to meat eaters. However, in those studies, the vegetarians ate more eggs and less fish than meat eaters, which was not the case in our study (Allès, et al., 2017; Bradbury, Tong, & Key, 2017). Similarly when comparing our study to the UK Biobank cohort, the main differences between regular

meat eaters and low meat eaters were primarily a lower intake of beef, processed meat (but not poultry) and bread, and a higher fish intake. However, there were no/few differences with respect to legumes, nuts and seeds and dairy products in the UK, whereas the difference was marked in our study. These differences were perhaps indicative of differences in vegetarian diets in countries such as France that do not have a large number of vegetarians and have negative attitudes towards vegetarianism, unlike northern Europe and the UK. The sociodemographic characteristics of vegetarians and meat eaters were similar to those seen in the Nutrinet-Santé study, as in both cases vegetarians were more likely than meat-eaters to be women, have a BMI within the 18.5-25 range and be single. Scores related to the belief that eating meat was expensive were similar across pro-flexitarians, flexitarians and vegetarians, even though incomes differed between these groups. This perhaps suggests that price was not a determinant of a low-meat diet in this population. Flexitarians reported a lower food intake compared to omnivores and pro-flexitarians, but as the study focused on food sources of protein, only partial intake was estimated, and no conclusions in terms of total volume or energy intake could be drawn. However, we were able to estimate that protein intake that was partial but expected to cover about 84% of total protein intake, was similar between vegetarians and flexitarians, which was in line with the findings of other studies (Clarys, et al., 2014).

Some limitations and uncertainties affecting this study need to be underlined. First, the hypotheses on the dynamic transition from classic Western diets to a lower meat intake could not be tested because the individuals did not report whether they had experienced a dietary transition or not, or the reasons why they would have experienced such a transition. Our results were nevertheless consistent with those reporting the past behavior of individuals. Moreover, the BMI and food intake values were estimated from declared data only, which may have involved a desirability bias and underestimation of the BMI and “unhealthy” food intakes (Gorber, Tremblay, Moher, & Gorber, 2007). Food intakes were estimated using a partial food frequency questionnaire, which had not been validated by another assessment such as 24h recalls. Therefore, these data could not be used to assess nutrient intakes or adequacies, or to study differences in energy intake between the diets. However, we were able to indirectly determine differences in diet quality between the dietary types, as red and processed meat intakes were lower among pro-flexitarians and flexitarians

than in omnivores, while the intakes of vegetables, legumes, nuts and seeds and fish were higher, which was in line with the latest dietary guidelines in France (Anses, 2016b). The diets of flexitarians and pro-flexitarians were therefore likely to be of better quality than those of omnivores, which may also partly explain the lower BMI seen among flexitarians and vegetarians than in omnivores. Contrary to those on energy and nutrient adequacy, the survey method was developed to adequately characterize profiles of dietary protein intake. The mean intakes of the food groups reported were at least 20% higher than those found in the 2014-2015 INCA3 study except for bread, milk and fast foods, whose intakes were lower. This is common as FFQs tend to overestimate intakes when compared to 24h recalls (Deschamps, et al., 2007). However, the present study focused on differences in intake between different dietary types and associations between intakes and attitudes, and not on absolute intakes. Finally, only 52 vegetarians were identified in our sample, which limited the statistical power of the analyses, and may explain why some contrasts between vegetarians and other groups were not found to be significant. However, as discussed before, our results were consistent with those of other studies involving a large number of vegetarians.

During this study, we were able to identify diets corresponding to grades of transition to low-meat diets. Pro-flexitarians appeared to be driven by environmental reasons, and these individuals had a lower beef and pork consumption and ate more vegetables and legumes than omnivores. Flexitarians appeared to be driven by health and animal welfare issues, were more used to meatless dishes and had lower intakes of red and processed meats. Finally, vegetarians considered that meat was not a necessary food for humans, and were concerned by animal welfare. We were able to predict overall meat intake from the score of intention to consume less meat and the PBC, and to predict intention from attitudes, social norms and PBC. Attitudes were the most important predictor of intention. We can therefore conclude that raising awareness to the impacts of high meat consumption on the environment, health and animal welfare could be a critical lever to enable a transition to low meat consumption. Indeed, it has been shown in some interventional studies that providing information on the impacts of meat consumption on health, the environment or animal welfare was associated with a reduced intention to consume and choose meat (Bianchi, Garnett, Dorsel, Aveyard, & Jebb, 2018).

Acknowledgments

The authors would like to thank Dr. Serge Hercberg (EREN, Bobigny, France) for access to the images of food portions.

References

- Allès, B., Baudry, J., Méjean, C., Touvier, M., Péneau, S., Hercberg, S., & Kesse-Guyot, E. (2017). Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Santé Study. *Nutrients*, 9, 1023.
- Amiot, C. E., El Hajj Boutros, G., Sukhanova, K., & Karelis, A. D. (2018). Testing a novel multicomponent intervention to reduce meat consumption in young men. *PloS One*, 13, e0204590.
- Anses. (2016a). Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles - www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf. Rapport d'expertise collective.
- Anses. (2016b). Updating of the PNNS guidelines: revision of the food-based dietary guidelines - <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-1EN.pdf>. Anses opinion - Collective expert report.
- Anses. (2017). Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>. Rapport d'expertise collective.
- Bianchi, F., Garnett, E., Dorsel, C., Aveyard, P., & Jebb, S. A. (2018). Restructuring physical micro-environments to reduce the demand for meat: a systematic review and qualitative comparative analysis. *The Lancet Planetary Health*, 2, e384-e397.
- Blundell, J., de Graaf, C., Hulshof, T., Jebb, S., Livingstone, B., Lluch, A., Mela, D., Salah, S., Schuring, E., van der Knaap, H., & Westerterp, M. (2010). Appetite control: methodological aspects of the evaluation of foods. *Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity*, 11, 251-270.
- Boutron-Ruault, M.-C., Mesrine, S., & Pierre, F. (2017). 12 - Meat Consumption and Health Outcomes. In F. Mariotti (Ed.), *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* (pp. 197-214): Academic Press.
- Bradbury, E. K., Tong, Y. T., & Key, J. T. (2017). Dietary Intake of High-Protein Foods and Other Major Foods in Meat-Eaters, Poultry-Eaters, Fish-Eaters, Vegetarians, and Vegans in UK Biobank. *Nutrients*, 9.
- Clarys, P., Deliens, T., Huybrechts, I., Deriemaeker, P., Vanaelst, B., De Keyzer, W., Hebbelinck, M., & Mullie, P. (2014). Comparison of Nutritional Quality of the Vegan, Vegetarian, Semi-Vegetarian, Pesco-Vegetarian and Omnivorous Diet. *Nutrients*, 6, 1318.
- Cleveland, D. A., & Gee, Q. (2017). 9 - Plant-Based Diets for Mitigating Climate Change. In F. Mariotti (Ed.), *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* (pp. 135-156): Academic Press.
- Clonan, A., Wilson, P., Swift, J. A., Leibovici, D. G., & Holdsworth, M. (2015). Red and processed meat consumption and purchasing behaviours and attitudes: impacts for

human health, animal welfare and environmental sustainability. *Public Health Nutrition*, 18, 2446-2456.

De Backer, C. J. S., & Hudders, L. (2015). Meat morals: relationship between meat consumption consumer attitudes towards human and animal welfare and moral behavior. *Meat Science*, 99, 68-74.

de Boer, J., Schösler, H., & Aiking, H. (2017). Towards a reduced meat diet: Mindset and motivation of young vegetarians, low, medium and high meat-eaters. *Appetite*, 113, 387-397.

de Gavelle, E., Huneau, J.-F., Fouillet, H., & Mariotti, F. (2018). The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults - In Press. *The Journal of Nutrition*.

Deschamps, V., de Lauzon-Guillain, B., Lafay, L., Borys, J. M., Charles, M. A., & Romon, M. (2007). Reproducibility and relative validity of a food-frequency questionnaire among French adults and adolescents. *European Journal of Clinical Nutrition*, 63, 282.

Dubuisson, C., Lioret, S., Touvier, M., Dufour, A., Calamassi-Tran, G., Volatier, J.-L., & Lafay, L. (2010). Trends in food and nutritional intakes of French adults from 1999 to 2007: results from the INCA surveys. *British Journal of Nutrition*, 103, 1035-1048.

FAO. (2018). FAOSTAT - <http://www.fao.org/faostat/en/#data/CL>.

FranceAgriMer. (2015). Impact de la crise économique sur la consommation de viande et évolution des comportements alimentaires. Les synthèses de FranceAgriMer, 21.

Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., & Tempio, G. (2013). Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Godfray, H. C. J., Aveyard, P., Garnett, T., Hall, J. W., Key, T. J., Lorimer, J., Pierrehumbert, R. T., Scarborough, P., Springmann, M., & Jebb, S. A. (2018). Meat consumption, health, and the environment. *Science*, 361.

Godin, G., & Kok, G. (1996). The theory of planned behavior: a review of its applications to health-related behaviors. *American Journal of Health Promotion*, 11, 87-98.

Gorber, S. C., Tremblay, M., Moher, D., & Gorber, B. (2007). A comparison of direct vs. self-report measures for assessing height, weight and body mass index: a systematic review. *Obesity Reviews*, 8, 307-326.

Graça, J., Calheiros, M. M., & Oliveira, A. (2015). Attached to meat? (Un)Willingness and intentions to adopt a more plant-based diet. *Appetite*, 95, 113-125.

Graça, J., Oliveira, A., & Calheiros, M. M. (2015). Meat, beyond the plate. Data-driven hypotheses for understanding consumer willingness to adopt a more plant-based diet. *Appetite*, 90, 80-90.

Halkjaer, J., Olsen, A., Bjerregaard, L., Deharveng, G., Tjønneland, A., Welch, A., Crowe, F., Wirfält, E., Hellstrom, V., & Niravong, M. (2009). Intake of total, animal and plant proteins, and their food sources in 10 countries in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition. *European Journal of Clinical Nutrition*, 63, S16-S36.

Jallinoja, P., Niva, M., & Latvala, T. (2016). Future of sustainable eating? Examining the potential for expanding bean eating in a meat-eating culture. *Futures*, 83, 4-14.

Kantar WorldPanel. (2017). Le Flexitarisme: les Français et la consommation de produits d'origine animale - <http://www.lafranceagricole.fr/r/Publie/FA/p1/Infographies/Web/2017-12-01/KWP%20pour%20MeatLab%20Charal%20-%20Viande%20Les%20franc%CC%A7ais%20et%20les%20prote%CC%81ines%20animales%20%282%29.pdf> (accessed on 18/12/2018).

Kline, R. B. (2015). *Principles and practice of structural equation modeling*: Guilford publications.

Latvala, T., Niva, M., Mäkelä, J., Pouta, E., Heikkilä, J., Kotro, J., & Forsman-Hugg, S. (2012). Diversifying meat consumption patterns: Consumers' self-reported past behaviour and intentions for change. *Meat Science*, 92, 71-77.

Le Moullec, N., Deheeger, M., Preziosi, P., Monteiro, P., Valeix, P., Rolland-Cachera, M.-F., Potier de Courcy, G., Christides, J.-P., Cherouvrier, F., & Galan, P. (1996). Validation du manuel-photos utilisé pour l'enquête alimentaire de l'étude SU. VI. MAX. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 31, 158-164.

Norat, T., Bingham, S., Ferrari, P., Slimani, N., Jenab, M., Mazuir, M., Overvad, K., Olsen, A., Tjønneland, A., Clavel, F., Boutron-Ruault, M.-C., Kesse, E., Boeing, H., Bergmann, M. M., Nieters, A., Linseisen, J., Trichopoulou, A., Trichopoulos, D., Tountas, Y., Berrino, F., Palli, D., Panico, S., Tumino, R., Vineis, P., Bueno-de-Mesquita, H. B., Peeters, P. H. M., Engeset, D., Lund, E., Skeie, G., Ardanaz, E., González, C., Navarro, C., Quirós, J. R., Sanchez, M.-J., Berglund, G., Mattisson, I., Hallmans, G., Palmqvist, R., Day, N. E., Khaw, K.-T., Key, T. J., San Joaquin, M., Hémon, B., Saracci, R., Kaaks, R., & Riboli, E. (2005). Meat, Fish, and Colorectal Cancer Risk: The European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, 97, 906-916.

Petti, A., Palmieri, B., Vadalà, M., & Laurino, C. (2017). Vegetarianism and veganism: not only benefits but also gaps. A review. *Progress in Nutrition*, 19, 229-242.

Piazza, J., Ruby, M. B., Loughnan, S., Luong, M., Kulik, J., Watkins, H. M., & Seigerman, M. (2015). Rationalizing meat consumption. The 4Ns. *Appetite*, 91, 114-128.

Pohjolainen, P., Vinnari, M., & Jokinen, P. (2015). Consumers' perceived barriers to following a plant-based diet. *British Food Journal*, 117, 1150-1167.

Pribis, P., Pencak, R. C., & Grajales, T. (2010). Beliefs and Attitudes toward Vegetarian Lifestyle across Generations. *Nutrients*, 2.

Rothgerber, H. (2017). 2 - Attitudes Toward Meat and Plants in Vegetarians. In F. Mariotti (Ed.), *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention* (pp. 11-35): Academic Press.

Ruby, M. B., Alvarenga, M. S., Rozin, P., Kirby, T. A., Richer, E., & Rutsztein, G. (2016). Attitudes toward beef and vegetarians in Argentina, Brazil, France, and the USA. *Appetite*, 96, 546-554.

Schösler, H., de Boer, J., & Boersema, J. J. (2012). Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution. *Appetite*, 58, 39-47.

Weibel, C., Ohnmacht, T., Schaffner, D., & Kossmann, K. (2019). Reducing individual meat consumption: the role of socio-psychological factors and the stage model of behavioral change. *Food Quality and Preference*.

WHO. (2000). *Obesity: preventing and managing the global epidemic*: World Health Organization.

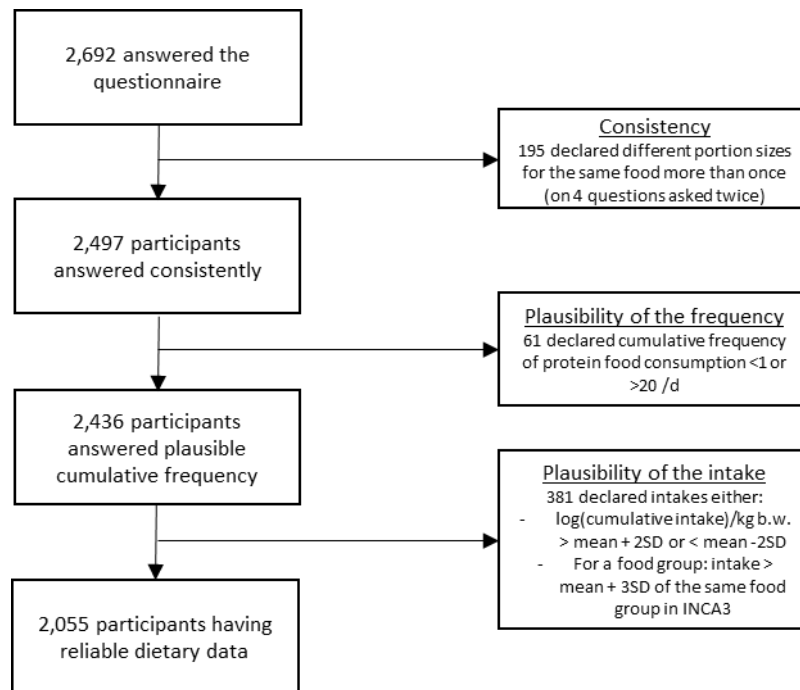
Wyker, B. A., & Davison, K. K. (2010). Behavioral Change Theories Can Inform the Prediction of Young Adults' Adoption of a Plant-based Diet. *Journal of Nutrition Education and Behavior*, 42, 168-177.

Zur, I., & A. Klöckner, C. (2014). Individual motivations for limiting meat consumption. *British Food Journal*, 116, 629-642.

Supplementary data

Supplemental Table 1. Food groups whose frequency of intake were assessed in the questionnaire. Questions about portion sizes were asked for the 10 food groups whose intake increased the most and the 10 food groups that decreased the most in de Gavelle et al. 2019, if consumed by individuals. If a food group whose intake increased the most in de Gavelle et al. 2019 was not consumed, the portion size of another food group was asked.

Food group	Evolution of the intake in de Gavelle et al. 2019 (de Gavelle et al. 2019)	Question about portion size
Overall meat	-	c.f. beef
Beef	Both	If consumed
Veal or lamb	-	c.f. beef
Pork (except ham and deli meat)	Decreased	If consumed
Sausages (Wieners, sausages, andouilles and puddings...)	Decreased	If consumed
Pâté, rillettes	Decreased	If consumed
Ham (cured or not, bacon)	Decreased	If consumed
Offal	Decreased	c.f. beef
Poultry (chicken, turkey...)	Both	If consumed
Fatty fish (salmon, sardines, mackerel...)	Increased	If consumed
Lean fish (tuna, cod, hake, sole...)	Increased	If consumed
Eggs and omelets	Decreased	If consumed
Cheese	Decreased	If consumed
Milk	-	Not asked (200g)
Yogurts and cottage cheese	Increased	Not asked (125g)
Meat-based dishes (cassoulet, beef bourguignon, couscous...)	Decreased	If consumed and 3 of the others are not
Dishes without filling (tripe, veal roulades, dumplings...)	Decreased	If consumed and 5 of the others are not
Prepared dishes based on vegetables (stuffed tomatoes, endive gratin, mousaka...)	Decreased	If consumed and 4 of the others are not
Dishes prepared with pasta or potatoes (ravioli, gratin dauphinois, Bolognese pasta...)	Decreased	If consumed and 1 of the other is not
Sandwiches	Decreased	If consumed and 6 of the others are not
Fast food (pizzas, kebabs, burgers...)	Decreased	If consumed and 7 of the others are not
Quiches and salty pies	Decreased	If consumed and 2 of the others are not
Pastas (excluding wholemeal pastas)	Both	If consumed
Bread (excluding wholemeal bread)	Both	If consumed
Whole grain rice, pastas or bread	Increased	Mean of rice, pastas and bread
Rice and wheat (semolina or cooked wheat)	Increased	If consumed
Spinach and chard	Increased	If consumed
Legumes (lentils, flageolets...)	Increased	If consumed
Nuts and seeds (almonds, hazelnuts, peanuts...)	Increased	If consumed



Supplemental Figure 1. Flow chart of the selection of reliable dietary data in the population sample (2018, n=2,055)

Supplemental references

de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F. The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. *J Nutr* 2019:nxy275-nxy. doi: 10.1093/jn/nxy275.

2.4. Travail personnel n°4 : Le régime alimentaire initial devrait être pris en compte lorsqu'on modifie les tailles des portions des aliments sources de protéines pour augmenter l'adéquation nutritionnelle chez les adultes français

Résumé

Contexte : Il existe une transition des profils de consommation protéique dans les pays occidentaux, mais les impacts de modifications de la consommation d'aliments protéiques sur l'adéquation nutritionnelle des régimes sont peu étudiés.

Objectif : Notre objectif était d'identifier des modifications simples de la consommation d'aliments protéiques qui augmentent graduellement l'adéquation nutritionnelle globale.

Méthode : Nous avons identifié des profils de consommation alimentaire protéique chez 1 678 adultes français à partir d'une enquête nationale représentative. Pour chaque individu, nous avons identifié l'augmentation de taille de portion d'un aliment protéique associée à une diminution de taille de portion d'un autre aliment protéique qui augmentait le mieux l'adéquation nutritionnelle (en utilisant le score probabiliste PANDiet). Ensuite, cette modification duale des régimes était itérée 20 fois pour chaque individu selon 2 scénarios, soit en manipulant l'apport d'aliments déjà consommés [scénario 1 (S1)] ou en permettant l'introduction d'aliments consommés par plus de 10% des individus ayant le même profil de consommation protéique [scénario 2 (S2)].

Résultats : Les meilleures modifications « pas-à-pas » de la consommation de sources de protéines consistaient principalement à réduire les portions de charcuterie (dans les deux scénarios), de sandwiches et de fromage (S2), tout en augmentant les portions de poissons gras et de volaille maigre (dans les deux scénarios) et de légumineuses (S2). Cependant, ces changements différaient selon le profil de consommation protéique initial de l'individu. Par exemple, dans le S2, la consommation de légumineuses augmentait chez les « consommateurs de volaille » et les « consommateurs de poisson » uniquement et la consommation de viande maigre chez les « consommateurs d'aliments à emporter » et les « consommateurs de lait » uniquement. L'amélioration de l'adéquation nutritionnelle globale était semblable d'un profil de consommation protéique initial à l'autre, mais elle était la résultante de modifications de l'apport en nutriments spécifiques différents selon le profil.

Conclusion : Au-delà de modifications génériques de la consommation d'aliments protéiques dans la population française, le profil de consommation protéique est essentiel pour identifier les groupes alimentaires les plus susceptibles d'augmenter l'adéquation nutritionnelle et le profil des nutriments dont l'adéquation peut être facilement améliorée.

Valorisation : Ce travail a été publié dans la revue *The Journal of Nutrition* (Volume 149, n°3) le 1^{er} mars 2019. La version présentée ci-après n'est pas la version éditée, mais la version acceptée pour publication dans *The Journal of Nutrition* après examens par des pairs. La version éditée est disponible sur le lien suivant : <https://academic.oup.com/jn/article-abstract/149/3/488/5281548> .

Messages-clés

- Des modifications pas-à-pas de la consommation d'aliments sources de protéines augmentent l'adéquation nutritionnelle des régimes.
- Les modifications les plus efficaces pour augmenter l'adéquation nutritionnelle sont de plus faibles portions de charcuterie, sandwiches et fromage et des portions plus importantes de poisson gras, volaille maigre et légumineuses, pour toute la population.
- Certaines modifications sont efficaces pour augmenter l'adéquation nutritionnelle uniquement pour certains profils de consommation protéique, étant donné les répertoires alimentaires et les profils nutritionnels spécifiques associés aux différents profils.
- Prendre en compte les profils de consommation protéique est essentiel pour identifier les modifications diététiques les plus susceptibles d'augmenter l'adéquation nutritionnelle.

Abstract

Background. Patterns of protein food intake are undergoing a transition in Western countries but little is known about how dietary changes to protein intake impact nutrient adequacy of the diet.

Objectives. Our objective was to identify simple modifications to protein food intake that can gradually increase overall nutrient adequacy.

Methods. We identified patterns of dietary protein intake in 1,678 adults from a representative French national dietary survey. For each individual, we identified the increase in portion size of one protein food paired with a decrease in portion size of another protein food that would best increase nutrient adequacy (using PANDiet probabilistic scoring). Then, such an optimum simple dual change was iterated 20 times for each individual according to two scenarios, either by manipulating the intake of foods already consumed (Scenario 1, S1) or by enabling the introduction of foods consumed by >10% of individuals with the same protein pattern (Scenario 2, S2).

Results. The optimum stepwise changes to protein intake primarily consisted in reducing portions of delicatessen (both scenarios), sandwiches and cheese (S2), while increasing portions of fatty fish and lean poultry (both scenarios) and legumes (S2). However, these changes differed depending on the initial dietary protein pattern of the individual. For example, in S2, legume intake increased among 'Poultry' and 'Fish' eaters only and low-fat meat among 'Take-away eaters' and 'Milk drinkers' only. The improvements in overall nutrient adequacy were similar among the different initial dietary patterns, but this was the result of changes to the adequacy of different specific nutrients.

Conclusions. Beyond generic changes to protein intake in the entire French adult population, the initial dietary protein pattern is key to identifying the food groups most likely to improve overall nutrient adequacy, and the profile of nutrients whose adequacy can easily be increased.

Keywords: Protein intake, dietary patterns, nutrient adequacy, portion size, simple changes

Introduction

After long-term trends following World War II, dietary patterns related to sources of protein have been evolving in recent years in western countries (1). Total meat consumption has fallen in France since the early 2000s (2, 3), with different trends depending on the meat considered - beef intakes tended to decrease (-15%) and poultry intakes tended to increase (+24%) between 2000 and 2015 in the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) countries (4). Moreover, the number of people adopting dietary patterns based on the consumption of specific protein foods, like vegetarians, have risen in France and other western countries (5, 6). Furthermore, French and U.S. national dietary guidelines have recommended a reduction in animal proteins (e.g. meat and processed meat) and an increase in the consumption of plant proteins (e.g. legumes) (7, 8). We can therefore expect that a rearrangement of dietary protein sources will continue in the coming years. However, because the nutrient profiles of different protein foods vary considerably (9, 10), patterns of protein food intake are important determinants of the nutrient profile of diets (11-14). Therefore, future changes in protein intake could be expected to affect the nutrient adequacy of the diet, and this effect would vary depending on the initial dietary profile of the individual.

Generic dietary guidelines are based on models designed to optimize diets with constraints to meet nutrient and dietary reference values while taking into account individual dietary habits (7, 8, 15). However the level of compliance with these guidelines is low (16, 17). One explanation is that generic guidelines do not account for the different dietary patterns of individuals, or the trajectory which should be adopted to move from their initial diets to an optimized diet. This goes in particular for the first changes that should be made that are mostly dependent on the initial diet. In this context, it seems relevant to study the effects of simple and operable changes to individual diets, such as changes to portion size. Indeed, portion sizes have been identified as acceptable and realistic levers to change consumption behavior (18-20). Furthermore, even if the introduction of new foods is acknowledged as a classic barrier to change, it is also well known to be an efficient lever for the nutritional improvement of diets (21, 22). It is therefore expected that the way and extent of improvements to the nutrient adequacy of the diet will vary depending on initial individual dietary profiles.

We saw that protein sources appear to be a part of the diet that is undergoing a transition, and portions sizes are acknowledged as being the best lever to modify food patterns. Our objective was to model a rearrangement of protein foods by simple modifications to portion sizes in order to increase the overall nutrient adequacy of French diets and study the degree to which the improvement might be sensitive to the initial pattern of protein intake.

Methods

Population, food intake and dietary composition

The population studied was derived from that covered by the second individual and national food consumption study (INCA2¹) performed in 2006-2007, as previously described (23). Briefly, we excluded adults over 65 years old (whose nutrient requirements differed from that of younger adults) and under- and over-reporters, which led to a final sample of 1,678 adults (717 men and 961 women). Under and over-reporters were identified by comparison of the reported energy intake and the basal metabolic rate, as estimated using Henry equations (24), and a cut off-value as defined by Black et al. (25). Food intakes were derived from 7-day food records, and individual characteristics from self-reported and face-to-face questionnaires, as described by Dubuisson et al. (26) (**Supplemental Table 1**). The nutrient composition of the foods has been previously described in detail (11). Briefly, the data was extracted from the 2016 CIQUAL (*Centre d'Information sur la Qualité des Aliments* – Centre for Information on Food Quality) database, an amino acid database as previously described (23), and databases on phytate (27), and heme and non-heme iron in animal foods (28-30). Protein digestibility (23) and the bioavailability of iron (31, 32) and zinc (33) were taken into account. The food groups presented in this paper were adapted from the INCA2 food groups, taking into account their fat content. Indeed, meat (excluding poultry) and poultry were both split into two groups depending on whether fat contributed to more than 35% of energy intake or not; 71% of meat foods were “fatty meat” and 61% of poultry foods were “fatty poultry”. Fish was considered as “fatty fish” if the EPA+DHA content was >1g/100g (7); 34% of fish foods were deemed to be “fatty fish”.

Based on the INCA2 population, eight clusters of individuals were identified in terms of their patterns of protein food intake (Processed meat eaters, Poultry eaters, Pork eaters, Traditional eaters, Milk drinkers, Take-away eaters, Beef eaters and Fish eaters), as described previously (11).

Nutrient adequacy

Nutrient adequacy was assessed using PANDiet probabilistic scoring (34), as described previously (11), with some modifications to implement the most recently published

¹ Abbreviations used: ANCOVA, analysis of covariance; AS, Adequacy Sub-score of the PANDiet; DHA, Docosahexaenoic Acid; EI, energy intake (without alcohol); EPA, Eicosapentaenoic acid; INCA2, Second Individual and National Study on Food Consumption Survey; LA, Linoleic Acid; MS, Moderation Sub-score of the PANDiet; PA, Probability of Adequacy; S1, first scenario; S2, second scenario. SFA, Saturated Fatty Acid

nutrient dietary reference values (**Supplemental Method 1**). Briefly, the PANDiet score is calculated as the mean of an Adequacy Sub-score (AS), which is the average of the probabilities of adequacy (PAs) of nutrients for which an Estimated Average Requirement is defined, and a Moderation Sub-score (MS), which is the average of the PAs of nutrients with an existing upper bound reference value. The reference values applied were mainly the most recent values published by Anses (35). As a result, we calculated for each individual the PANDiet score (from 0 to 100), in which a higher score reflects a higher overall nutrient adequacy of the diet.

Statistical analyses and models

Stepwise dietary models of changes were used to improve the initial PANDiet score calculated for each individual. The models consisted of a paired increase in the portion size of a protein food with a reduction in the portion size of another protein food in the 7-day diets of the INCA2 individuals. Every possible paired modification was simulated, and the PANDiet score was calculated. The paired modification that most markedly increased the PANDiet score was selected and virtually integrated in the diet of the individual, and this process was iterated 20 times. We arbitrarily limited the models to 20 steps in order to avoid any drastic change to the rearrangements of the diets. Two different scenarios were implemented, depending on the possibility to broaden the food repertoire of the individuals.

In the first scenario (S1), individuals could only have paired modifications between two protein foods that they already consumed, and the introduction of “new” foods outside their food repertoire was forbidden. In the second scenario (S2), the introduction of new foods was permitted, but only if these foods were consumed by individuals with a similar patterns of protein food intake, as we had defined previously in the same population (11). In other words, the portion size of a protein food consumed by an individual could be reduced, and paired with the introduction at the portion size step (see below) of a protein food consumed by 10% of the cluster to which the individual belonged.

Protein foods were defined as INCA2 food items which met two criteria: 1) the percentage energy from protein was >10%, which refers to their intrinsic protein content, 2) the level of intake at the 90th percentile was >5g protein/portion, which refers to their potential contribution to protein intake at a relatively high level. The percentages of protein foods in each food group are detailed in **Supplemental Table 2**, and the detailed method about the paired modifications of portion sizes, adapted from Bianchi et al. (21), is presented in **Supplemental Method 2** and **Supplemental Figure 1**. An example of an individual food record before and after 20 steps of the S2 is presented in **Supplemental Table 5**.

Data are means $\pm$ SDs. An overall α level of 5% was used for statistical tests. All means are weighted to account for the study design and ensure the representativeness of the sample as described by Dubuisson et al. (26). ANCOVAs adjusted for sex were used to test the significance of the differences between the initial (observed) and each of the 2 final (simulated) diets in the contributions of food groups to protein intake, and in the probabilities of adequacy when the difference was tested in clusters. ANCOVAs adjusted for sex were also used to test the significance of the difference between each cluster and the overall sample for the increments of probabilities of adequacy, and to test the association between the increment of PANDiet, the initial number of protein food groups consumed, and the initial PANDiet score. Differences in increments of PANDiet, AS or MS scores were also tested using ANCOVA adjusted for sex, with additional adjustments for the initial PANDiet score and the number of initial protein food groups.

Statistical analyses and modelling were performed using SAS 9.1.3 (version 9.1.3, SAS Institute Inc., Cary, NC).

Results

For clarity purposes, the results on clusters are only reported here for four of the eight clusters that were identified, as these clusters differed more markedly from the overall population than the others. The results of all clusters are detailed in **Supplemental Tables 3-4**.

Extent of rearrangements of the diets

The diets of individuals involved 152.1 ± 42.9 acts of consumption recorded over 7 days, including 28.6 ± 9.3 concerning animal protein foods and 15.1 ± 6.6 relating to plant protein foods. The 20 steps in the stepwise model, making 40 possible modifications to portions of acts of consumption of the diets, led to 17.8 ± 3.9 modifications to different acts of consumption in S1 and 23.0 ± 4.4 in S2, which means that there was approximately two increases or decreases of portion size per act of consumption. In S1, recommended changes consisted of smaller portions of 5.4 ± 2.3 animal protein and 3.3 ± 2.6 plant protein foods, with a mean reduction of 2.6 ± 1.1 portion size steps per protein food. Likewise, in S2, changes consisted of smaller portions of 6.4 ± 2.5 animal and 3.7 ± 3.0 plant protein foods, with a mean reduction of 2.1 ± 0.8 portion size steps per protein food. In S1, larger portions of 5.7 ± 2.1 animal protein and 3.9 ± 2.3 plant protein foods were recommended, with 2.2 ± 0.7 supplementary portion size steps in each case. In S2, 10.1 ± 3.5 animal protein and 2.0 ± 1.9 plant protein foods not originally consumed by the individuals were introduced, resulting in a mean of 1.6 ± 0.4 supplementary portion size steps. Almost no foods already consumed by the individuals increased in S2. Lastly, most of the acts of consumption of the diets were unaffected by the modifications (88.3% and 86.0% for S1 and S2, respectively) (**FIGURE 1**).

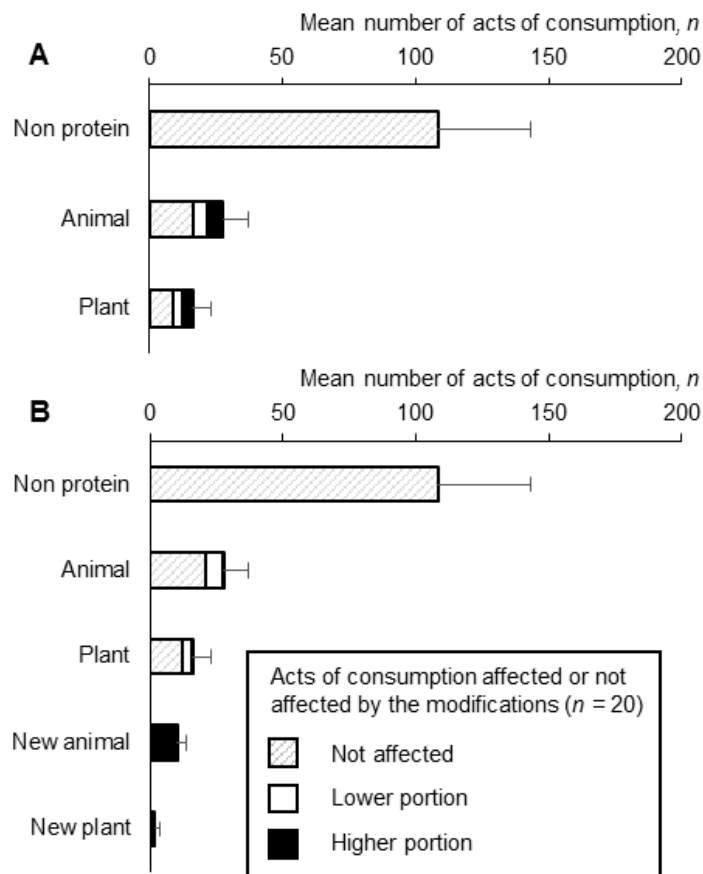


FIGURE 1. Mean number of acts of consumption of non-protein, animal protein and plant protein foods affected or not by rearrangements of the diets after 20 steps of the stepwise model in the INCA2 population ($n=1,678$). The bars are means and the error bars are the standard deviation of the total numbers acts of consumption. In Scenario 1 (A), dual changes in portion size (i.e. reduction in one protein food and increase in another) were only permitted between foods already consumed by the individuals, and in Scenario 2 (B) “new” protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belonged. Therefore, acts of consumption involving “new” animal and plant protein foods involved those consumed by 10% of the cluster but not originally consumed by the individuals. As “new” foods refer to foods not originally consumed, they are not presented as a part of the initial bar of acts of consumption, but as a new bar in the figure. Protein foods were considered to be “animal” or “plant” if >50% of protein in the food originated from animal or plant sources.

Evolution of the contribution of protein food groups to protein intake

Mean plant protein intakes remained stable from 31.3% (± 8.1) of total protein intake in the initial situation to 31.5% (± 8.4) in S1 and decreased to 30.0% (± 7.6) in S2. Under both scenarios, the main contribution to protein intake of low-fat meat (women only), low-fat poultry,

fatty fish, eggs and derivatives (men only), pizzas and quiches and legumes (women only) increased, as opposed to high-fat meat (women only), delicatessen and bread (women only) which decreased (**FIGURE 2**). In S1 only, the contributions of pasta and lean fish to protein intake increased, while in S2 only, the contribution of yogurts to protein intake increased, and that of high-fat poultry and sandwiches decreased. In S1, the highest rates of increases in the contribution to protein intake concerned lean poultry (+45% compared to the initial contribution), pasta (+40%), legumes (+31%), fatty fish (+26%) and lean meat (+25%), whereas the greatest reductions involved delicatessen (-54%), high-fat meat (-10%) and prepared dishes (-8%). Likewise in S2, the highest increases were for legumes (+225%), fatty fish (+152%), lean poultry (+82%), pizzas and quiches (+61%) and yogurts (+34%) and the most marked reductions concerned delicatessen (-52%), sandwiches (-31%) and cheese (-25%).

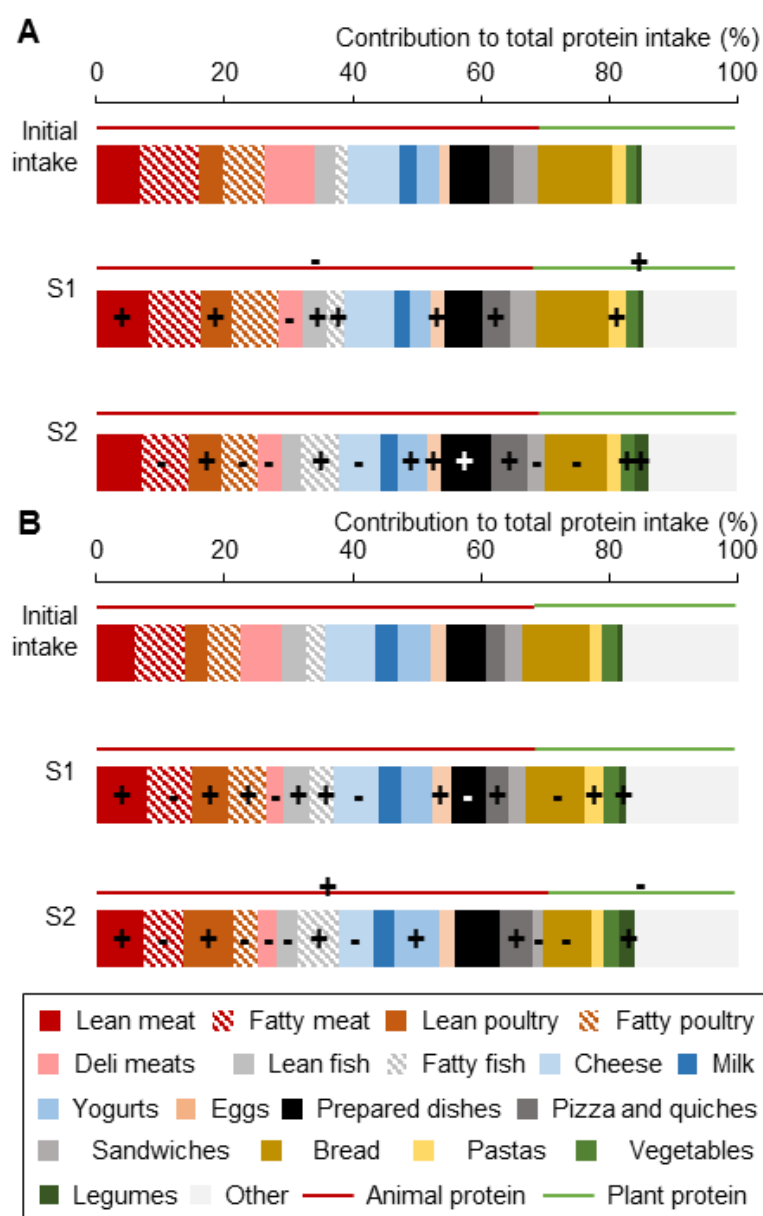


FIGURE 2. Mean contributions of different food groups to protein intake (%) in the initial situation and after 20 steps of the stepwise models in men (A) and women (B) in the INCA2 population (2006-2007) (n=1,678). In S1 (Scenario 1), dual changes in portion size (i.e. a reduction in one protein food and an increase in another) were only permitted between foods already consumed by the individuals, and in S2 (Scenario 2) “new” protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belonged. “+” means that the mean contribution was higher than in the initial situation and “-” means it was lower ($P < 0.05$). For example, after 20 steps in the scenario S1, lean meat contributed to 8.0% of total protein intake in men, which is significantly higher than the 6.9% in the initial situation. The food groups shown contributed to $>2\%$ of total protein intake in at least one gender in the initial situation, S1, or S2, and gained or lost $>1\%$ in S1 or S2.

The rearrangements to protein intake varied according to the four different clusters of dietary protein patterns presented. Indeed, although some food groups were rearranged similarly in all clusters (reduction in delicatessen in both scenarios, reduction of high-fat meat and bread in S2, increase in lean poultry in S2 and pasta in S1), some rearrangements were specific to certain clusters (**FIGURE 3**). The contribution of lean meat to protein intake increased in S2 among 'Take-away eaters' and in both scenarios among 'Milk drinkers'. Lean poultry increased among 'Milk drinkers' only in S1. Fatty poultry consumption fell in S2 among 'Poultry eaters' and 'Fish eaters'. The contribution of fatty fish increased in all clusters except 'Take-away' eaters in both scenarios and 'Fish eaters' in S1. That of prepared dishes decreased in S2 among all clusters except for 'Take-away' eaters for which it increased. The contribution of pizzas and quiches increased in S2 for 'Take-away eaters' only. That of sandwiches decreased in S2 among all clusters except for 'Fish eaters'. The contribution of bread increased in S1 in all clusters, but not among 'Fish eaters'. Finally, the contribution of vegetables increased among 'Milk drinkers' only, and that of legumes increased in S2 among 'Poultry' and 'Fish eaters' only. The results for all eight clusters are presented in **Supplemental Table 3**.

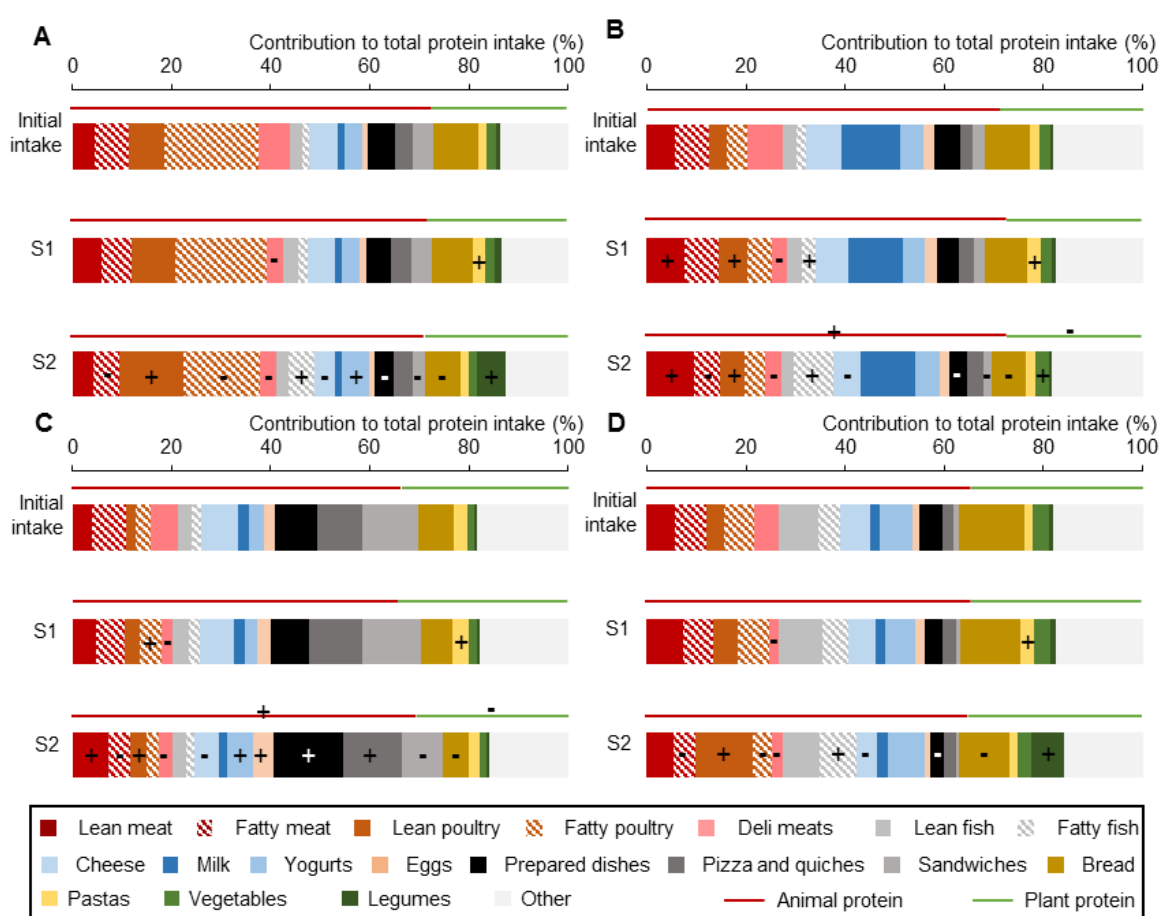


FIGURE 3. Mean contributions of different food groups to protein intake (%) in the initial

situation and after 20 steps of the stepwise models in four of the eight clusters of protein intake in the INCA2 population (2006-2007) (n=1,678). A, Poultry eaters; B, Milk drinkers; C, Take-away eaters; D, Fish eaters. In S1 (Scenario 1), dual changes in portion size (i.e. reduction in one protein food and increase in another) were only permitted between foods already consumed by the individuals, and in S2 (Scenario 2) “new” protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belonged. “+” means that the mean contribution was higher than in the initial situation and “-“ that it was lower ($P < 0.05$, adjusted for sex). For example, after 20 steps in the scenario S1, delicatessen meat contributed to 3.3% of total protein intake among ‘Poultry eaters’, which is significantly lower than the 6.3% in the initial situation. The food groups shown contributed to $>2\%$ of total protein intake in at least one of the eight clusters in S1 or S2, and gained or lost $>1\%$ in S1 or S2.

Changes in nutrient adequacy

In S1 the increment in the PANDiet score (compared to the initial situation) was significantly associated with the initial number of protein food groups ($\beta = 0.15$, $P < 0.0001$) and the initial PANDiet score ($\beta = -0.10$, $P < 0.0001$), independently of the sex and cluster. In S2, the increment in the PANDiet was significantly associated with the initial number of protein food groups ($\beta = -0.08$, $P < 0.0001$) and the initial PANDiet score ($\beta = -0.22$, $P < 0.0001$), independently of the sex and cluster.

The mean PANDiet score rose by $3.6 (\pm 1.7)$ after 20 iterations in S1, and by $7.5 (\pm 2.6)$ in S2. Without adjustment for initial PANDiet score and initial number of protein food groups, ‘Poultry eaters’ saw a greater increase than the overall sample (8.6 ± 3.0 , $P < 0.0001$) and ‘Milk drinkers’ a lower increase than the overall sample (6.7 ± 2.1 , $P < 0.0001$) in S2 (**Supplemental Figure 2**). In S1, the mean Adequacy Sub-score (AS) of the PANDiet score increased by $2.9 (\pm 2.7)$. The most important increases of PA were that of vitamin B-6 (7.4 ± 11.2), vitamin B-12 (7.3 ± 12.7) and EPA + DHA (7.0 ± 12.9). The mean MS increased by 4.41 ± 3.4 . The most important increases of PA were that of SFA (9.8 ± 11.9), total fat (7.7 ± 13.4) and sodium (6.6 ± 9.9). In S2, the mean AS increased from 64.4 to 74.1 (9.7 ± 4.6). The most important increases of PA were that of EPA+DHA (43.7 ± 37.1), vitamin B-6 (19.2 ± 22.2) and vitamin B-12 (18.7 ± 24.1). The mean MS rose from 63.5 to 68.7 (5.2 ± 3.8). The most important increases of PA were that of SFA (12.7 ± 14.1), total fat (10.1 ± 16.4) and sodium (7.2 ± 10.7). After adjustment for the initial PANDiet score and the initial number of protein food groups, ‘Poultry eaters’ and ‘Fish eaters’ had a higher increase of PANDiet than the overall sample, and ‘Milk drinkers’ and ‘Take-away eaters’ a lower increase in S2.

The increments varied depending on the initial cluster. Indeed, although the PAs of total fat and vitamin B-12 increased in all clusters and all scenarios and the PAs of copper, iron, iodine, riboflavin, folate and vitamin B-6 increased in all clusters in S2, some PAs increased in some clusters but not others (**FIGURE 4**). The PAs of EPA+DHA and sodium increased in S2 in all clusters except for ‘Take-away eaters’. The PA of fiber increased among ‘Poultry’ and ‘Fish eaters’ but not in the other clusters in S2, and the PA of zinc increased among ‘Take-away eaters’ and ‘Milk drinkers’, but not in the other clusters in S2. The PAs of calcium, potassium and vitamin A increased in S2 in all clusters except for ‘Fish eaters’. The results for all eight clusters are presented in **Supplemental Table 4**.

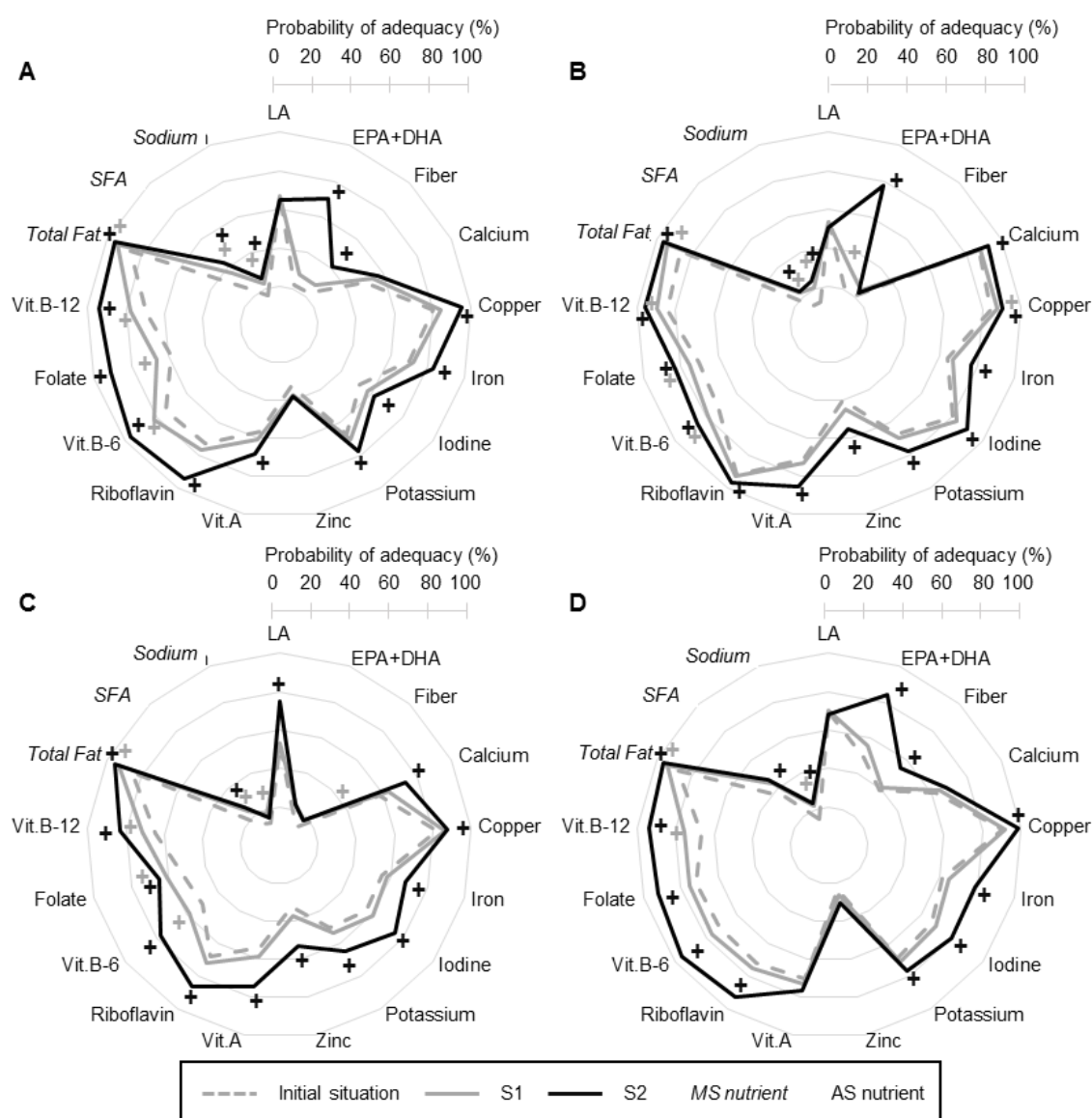


FIGURE 4. Mean probabilities of adequacy of nutrients making the most contribution to changes in the PANDiet score in four of the eight clusters of protein intake in the INCA2

population (2006-2007) (n=1,678), in the initial situation, and the two scenarios for a rearrangement of protein intake. A, Poultry eaters; B, Milk drinkers; C, Take-away eaters; D, Fish eaters. In S1 (Scenario 1), dual changes in portion size (i.e. a reduction in one protein food and an increase in another) were only permitted between foods already consumed by the individuals, and in S2 (Scenario 2) “new” protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belonged. For example, the probability of adequacy of EPA+DHA was 70.2% after 20 steps in the scenario S2, which is significantly higher than 21.9% in the initial situation. The probabilities of adequacy that contributed to <0.5 to the increase in the adequacy or moderation sub-scores of the PANDiet score were not shown. AS, Adequacy Sub-score of the PANDiet; Chol, Cholesterol; DHA, Docosahexaenoic Acid; EI, Energy Intake (without alcohol); EPA, Eicosapentaenoic acid; LA, Linoleic Acid; MS, Moderation Sub-score of the PANDiet; SFA, Saturated Fatty Acid. “+” means that the mean contribution was greater than in the initial situation and “-“ means it was lower (P<0.05).

In S2, the increase in the AS and MS was higher among ‘Poultry eaters’ than in the overall population (respectively 10.7 ± 5.2 , $P<0.001$ and 6.5 ± 4.5 , $P<0.0001$), due to higher increases in PAs for riboflavin, folate, vitamin B-6, B-12, fiber and SFA. The increment in the AS was lower among ‘Milk drinkers’ than in the overall population (7.7 ± 3.6 , $P<0.0001$) due to lower increments of PAs for fiber, folate and vitamin B-6. The increment in the MS was smaller among ‘Take-away eaters’ than in the overall population (4.2 ± 4.4 , $P<0.01$), due to the lower PA for sodium. This cluster had lower PAs for folate, EPA+DHA and fiber but higher PAs for vitamin A, zinc and LA. Finally, the increments in the AS and MS among ‘Fish eaters’ did not differ significantly from those in the overall population, but the increments in fiber and Vitamin B-12 were higher than in the overall population (**Supplemental Figure 3**).

Discussion

We showed that the nutrient adequacy of the diet could be increased by means of small and a priori acceptable rearrangements to the protein intake of the diet. Another important finding was that some changes were common to most individuals whereas others were specific to the initial pattern of protein intake. This is explained by the presence or absence of certain levers in the food repertoire, and by the initial profile of nutrient adequacy. Accordingly, although the overall improvement was the same, the final profile of nutrient adequacy was closely dependent on the initial pattern of protein intake of the individuals.

Characteristics of dietary rearrangements

Because the actual number of modified acts of consumption was limited (11.7% and 14.0% of the total acts of consumption in the 7-day food records in S1 and S2 respectively), and as the modifications often concerned the same food groups (e.g. 31 and 28% of the foods whose portions were reduced were delicatessen in S1 and S2, respectively), it could be considered that the changes simulated in the models constituted very moderate rearrangements of the diets that could be well accepted. Furthermore, the changes were based on modifications to portion sizes, which was acknowledged as being an acceptable lever to modify the dietary structure of the protein sources consumed (18, 36, 37). Experiments have shown that modifying the portion sizes of meat products can change the food behaviors of consumers without affecting their satisfaction (19) and without the need for any compensation (20).

In S2, almost all the increases in portion sizes actually consisted in introducing new foods from the cluster food repertoire. This showed that, even though it seemed more acceptable to simply change the portion sizes of foods already consumed (as in S1), the introduction of new foods (as in S2) is required for a higher increase in nutrient adequacy.

Nature and impacts of the rearrangements

In the overall population, we were able to identify certain food groups that were critical to the improvement of nutrient adequacy when portion sizes were modified, whatever the specificity of the initial protein intake. These findings add important data to the debate on the nutritional value of protein sources (9, 10, 38-41) and could have practical implications for the development of dietary guidelines that advocate changes to protein intake.

When using only protein foods already consumed by the individuals (S1), improvements in nutrient adequacy were mainly due to the reduction of nutrients whose intake

needed to be moderated (moderation sub-score), namely SFA, total fat and sodium. This was mainly explained by the reduction in portion sizes of delicatessen in the overall population and fatty meat in women. The parallel increases in portion sizes (mainly of lean poultry and pasta) were sufficient to maintain the intakes of indispensable nutrients, but resulted in a moderate increase in the adequacy sub-score. It thus appeared that when limited to the food repertoires of individuals, a rearrangement of protein intake to achieve a better overall nutrient adequacy was mainly driven by reductions in the portions of “unhealthy” foods for everyone (namely delicatessen).

By contrast, when allowing the introduction of protein foods consumed by individuals with similar patterns of protein intake (S2), an improvement in nutrient adequacy could be explained by an increase in both the sub-scores of moderation (MS) and adequacy (AS). It appeared that beneficial rearrangements of protein food intake were largely dependent on the presence or absence of certain food groups in the food repertoire of the clusters. Indeed, as ‘Fish’ and ‘Poultry’ eaters had legumes in their food repertoire, respectively 35% and 29% of the increases in portion size concerned legumes in these clusters, and the PAs for fiber increased more compared to the overall population. After adjustment for the initial PANDiet score and initial number of protein food groups, the increments of PANDiet were higher in these clusters than in the overall population. Conversely, legumes were not included in the cluster repertoire of ‘Milk drinkers’ whereas vegetables (mostly spinach) and fatty fish were. This resulted in the fact that 12% and 16% of the total increases in portions were vegetables and fatty fish (respectively), leading to greater improvements in the adequacy of intakes for EPA and DHA when compared to the overall population. Finally, legumes, vegetables or fatty fish were not in the repertoire of ‘Take-away eaters’, but prepared dishes (mostly chicken cordon bleu) and lean meat were. Therefore 19% and 15% of the total increases in portions were made up of prepared dishes and lean meat. The improvements in adequacy for zinc, vitamin B-6 and LA were higher, but the improvement in adequacy for sodium was lower among ‘Take-away eaters’ than in the overall population. Finally, after adjustment for the initial PANDiet score and the initial number of protein groups, the increments of AS and PANDiet were lower among ‘Milk drinkers’ and ‘Take-away eaters’, and the increment of MS was lower among ‘Take-away eaters’ than in the overall population. More globally, the increment in the PANDiet score was much higher when expanding the habitual protein food repertory of individuals, which is in line with a general idea proposed in previous studies (21, 22). Our results clearly showed that the improvement in nutrient adequacy was closely dependent on the initial pattern of protein intake. This initial pattern was itself associated with a specific nutrient profile, and with the likelihood of introducing certain specific alternative foods that did not constitute part of the basic structure of intake. Accordingly, the highest relative increments

of AS were seen in clusters that included legumes in their repertoires. The ability to expand the type of protein intake is critical in achieving the correct path towards nutritional improvement.

The adequacy of the intakes of some nutrients was unaffected among most of the clusters, either because the PAs were originally close to 100% (e.g. potassium, niacin) or because the rearrangements to protein intake were independent of their effect on the adequacy of these nutrients (e.g. LA or ALA). This indeed points at a separate rearrangement of specific sources of fats such as oils, as it is classically advocated in dietary guidelines (8, 42).

It is difficult to compare the changes to protein intake identified here with general dietary guidelines, because the latter are built on a modelled diet (7, 8, 15, 43) that takes into account all food groups and parameters apart from nutrient adequacy, such as epidemiological risk (e.g. limiting intakes of red meat and delicatessen). Furthermore, in the reference diets that support general guidelines, nutrient adequacy is usually a constraint, whereas in our stepwise approach, improved nutrient adequacy is the objective. Indeed, the aim of the present research was to characterize the first changes that would need to be made regarding protein choices to achieve better nutrient adequacy, while taking into account the obstacles linked to consumption habits, rather than focusing on a distant general optimal diet. However, these pathways towards improvement do not contradict general guidelines. This is shown by our finding on the importance of reducing the intake of delicatessen and increasing that of legumes, vegetables, fatty fish and yogurts, which have been advocated by the French Food Agency and the 2015-2020 US dietary guidelines (7, 8).

Some limitations affecting our study methodology should be underlined. Our models did not lead to a reduction in total meat intake (except for delicatessen meat), because no specific epidemiological-based target for reduction was implemented. Moreover, the initial meat consumption was moderate, and the substitution of fatty meat by lean meat improved overall nutrient adequacy. The PAs of nutrients in the MS have more weight in the PANDiet score than the nutrients of the AS, as there are fewer nutrients in the MS than in the AS. This may partly explain why the rearrangements mostly seemed to be driven by the PAs of SFA and Na in the simulations. However, the rationale for the construction of the PANDiet score is to achieve an equal balance between positive and negative sub-scores, and this also ensures a weak association with energy intake.

The type of scenarios for the changes (based on either the individual or cluster repertoires) exerted a strong influence on the results of this study. Indeed, interpretation of the results of the cluster repertoire scenario (S2) relative to the general population could not seem

relevant as it was driven by the cluster repertoires. However, the S2 could be interpreted as a probabilistic approach to identifying protein foods that individuals do consume occasionally but that were not captured in the 7-day food record. Indeed, although this food record method is relevant to studying food intakes at a population level, it involves some uncertainties when trying to evaluate the usual food repertoire of individuals using a record of a few days at a certain time of the year. Our approach using the cluster repertoire could therefore offer a means to include foods that are “probably/possibly consumed” by individuals. Finally, the cluster repertoire may represent a scenario for changes to the intake of protein foods that might be acceptable to the individuals concerned.

The rules of compatibility between food groups were established to avoid paired modifications that were not relevant (e.g. an increase in yogurt intake paired with a reduction in delicatessen intake) and also influenced the results. Indeed, because milk portions could only be replaced by other milks or plant-based milk, the milk intake remained constant in all scenarios. However, these rules were necessary to ensure that the modifications made sense in the prevailing diet context, and that they were acceptable and realistic. A study identified empirically which foods are usually replaced by other foods in the current dietary context and validated some of our rules: for example, bread can be replaced by rusks or viennoiseries at breakfast, and by other foods such as potatoes at lunchtime (44).

To conclude, we identified nutritional levers to increase nutrient adequacy using simple and in principle acceptable rearrangements of protein food intakes based on changes to portion sizes in the diets of a representative French population. We found that minor rearrangements to protein food intakes were efficient in significantly improving the overall nutrient adequacy of the diets. Changes to the portion size of some food groups were efficient in the overall population, and consisted in reducing the portions of delicatessen, sandwiches and cheese, and increasing the portions of legumes, fatty fish and lean poultry. However, the food groups that proved to be efficient nutritional levers differed depending on the initial pattern of protein intake, and ultimately the type of improvement to nutrient adequacy differed between the clusters of protein intake. This could mainly be ascribed to the presence or absence of food groups in the food repertoires of individuals, which did or did not offer easy and efficient solutions to improve the specific profile of nutrient adequacy associated with their pattern of protein intake. Therefore, in order to better address the rearrangements of consumption that individuals could implement, it seems important to increase their willingness to consume a large number of protein foods that are levers for nutritional adequacy.

This work thus showed that changes to the type of protein intake offer an efficient means to improve nutrient adequacy of the diet, while advocating the importance of developing

guidelines for optimum choices among protein foods. We also showed that the variety of initial patterns might limit the practical applicability of food dietary guidelines in an overall population. Identification of the dietary background profile using patterns of protein intake proved to be useful to indicate the practical best options of changes from the various initial patterns of protein intake.

Acknowledgements

E.G., F.M. and J-F.H. designed the study. E.G. analyzed the data, performed the statistical analysis and wrote the first draft of the manuscript; F.M., J-F.H., H.F. contributed to writing the manuscript and offered critical comments; E.G., F.M., J-F.H. and H.F. interpreted the results; E.G. and F.M. had primary responsibility for final content; and all authors read and approved the final manuscript.

References

1. Winnie Gerbens-Leenes P. 8 - Dietary Transition: Longterm Trends, Animal Versus Plant Energy Intake, and Sustainability Issues A2 - Mariotti, François. Edition ed. Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention: Academic Press, 2017:117-34.
2. FranceAgriMer. Impact de la crise économique sur la consommation de viande et évolution des comportements alimentaires. Les synthèses de FranceAgriMer 2015;21.
3. Duchène C, Lambert J-L, Tavoularis G. La consommation de viande en France - <http://www.civ-viande.org/wp-content/uploads/2017/05/CIV-Consov-V11-BD.pdf> (accessed on 17/04/2018). Cahiers nutrition du CIV 2017.
4. OECD. Meat consumption (indicator) (Accessed on 02 March 2018). 2015.
5. Mathieu S, Dorard G. Vegetarianism and veganism lifestyle: Motivation and psychological dimensions associated with selective diet. Presse medicale (Paris, France: 1983) 2016;45(9):726-33.
6. Anses. Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>. Rapport d'expertise collective 2017.
7. Anses. Updating of the PNNS guidelines: revision of the food-based dietary guidelines - <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-1EN.pdf>. Anses opinion - Collective expert report 2016.
8. U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture. 2015–2020 Dietary guidelines for Americans - Available at <http://health.gov/dietaryguidelines/2015/guidelines/> (accessed on 01/03/2018). In: USDA, ed. Washington (DC), 2015.
9. Phillips SM, Fulgoni VL, Heaney RP, Nicklas TA, Slavin JL, Weaver CM. Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy. Am J Clin Nutr 2015;101(6):1346S-52S. doi: 10.3945/ajcn.114.084079.
10. Petersen KS, Flock MR, Richter CK, Mukherjea R, Slavin JL, Kris-Etherton PM. Healthy Dietary Patterns for Preventing Cardiometabolic Disease: The Role of Plant-Based Foods and Animal Products. Current Developments in Nutrition 2017;1(12):cdn.117.001289-cdn.117. doi: 10.3945/cdn.117.001289.

11. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. *Nutrients* 2018;10(2):226.
12. Mariotti F, Huneau J-F. Plant and Animal Protein Intakes Are Differentially Associated with Large Clusters of Nutrient Intake that May Explain Part of Their Complex Relation with CVD Risk. *Adv Nutr* 2016;7(3):559-60. doi: 10.3945/an.115.011932.
13. Shang X, Scott D, Hodge A, English DR, Giles GG, Ebeling PR, Sanders KM. Dietary protein from different food sources, incident metabolic syndrome and changes in its components: An 11-year longitudinal study in healthy community-dwelling adults. *Clin Nutr* 2017;36(6):1540-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2016.09.024>.
14. Camilleri GM, Verger EO, Huneau J-F, Carpentier F, Dubuisson C, Mariotti F. Plant and animal protein intakes are differently associated with nutrient adequacy of the diet of French adults. *J Nutr* 2013;143(9):1466-73.
15. Public Health England. From Plate to Guide: What, why and how for the eatwell model -
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/579388/eatwell_model_guide_report.pdf (accessed on 02 May 2018). 2016.
16. de Abreu D, Guessous I, Vaucher J, Preisig M, Waeber G, Vollenweider P, Marques-Vidal P. Low compliance with dietary recommendations for food intake among adults. *Clin Nutr* 2013;32(5):783-8. doi: 10.1016/j.clnu.2012.11.022.
17. Escalon H, Bossard C, Beck F, Bachelot-Narquin R. Baromètre santé nutrition 2008. Baromètres Santé. Saint-Denis, 2009:424.
18. Vanhonacker F, Van Loo EJ, Gellynck X, Verbeke W. Flemish consumer attitudes towards more sustainable food choices. *Appetite* 2013;62(Supplement C):7-16. doi: <https://doi.org/10.1016/j.appet.2012.11.003>.
19. Reinders MJ, Huitink M, Dijkstra SC, Maaskant AJ, Heijnen J. Menu-engineering in restaurants - adapting portion sizes on plates to enhance vegetable consumption: a real-life experiment. *Int J Behav Nutr Phys Act* 2017;14:41. doi: 10.1186/s12966-017-0496-9.
20. Vandenbroele J, Slabbinck H, Van Kerckhove A, Vermeir I. Curbing portion size effects by adding smaller portions at the point of purchase. *Food Qual Prefer* 2018;64(Supplement C):82-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.10.015>.

21. Bianchi CM, Huneau J-F, Barbillon P, Lluch A, Egnell M, Fouillet H, Verger EO, Mariotti F. A clear trade-off exists between the theoretical efficiency and acceptability of dietary changes that improve nutrient adequacy during early pregnancy in French women: Combined data from simulated changes modeling and online assessment survey. *PLoS One* 2018;13(4):e0194764.
22. Maillot M, Vieux F, Ferguson EF, Volatier J-L, Amiot M-J, Darmon N. To Meet Nutrient Recommendations, Most French Adults Need to Expand Their Habitual Food Repertoire. *J Nutr* 2009;139(9):1721-7. doi: 10.3945/jn.109.107318.
23. de Gavelle E, Huneau J-F, Bianchi MC, Verger OE, Mariotti F. Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults. *Nutrients* 2017;9(12). doi: 10.3390/nu9121333.
24. Henry C. Basal metabolic rate studies in humans: measurement and development of new equations. *Public Health Nutr* 2005;8(7a):1133-52.
25. Black AE. Critical evaluation of energy intake using the Goldberg cut-off for energy intake: basal metabolic rate. A practical guide to its calculation, use and limitations. *Int J Obes* 2000;24(9):1119.
26. Dubuisson C, Lioret S, Touvier M, Dufour A, Calamassi-Tran G, Volatier J-L, Lafay L. Trends in food and nutritional intakes of French adults from 1999 to 2007: results from the INCA surveys. *Br J Nutr* 2010;103(07):1035-48.
27. Amirabdollahian F, Ash R. An estimate of phytate intake and molar ratio of phytate to zinc in the diet of the people in the United Kingdom. *Public Health Nutr* 2010;13(9):1380-8.
28. Centre d'Information des Viandes & INRA. Internet: <http://www.lessentieldesviandes-pro.org/pdf/PDF-tous%20morceaux.pdf> (accessed 08/03/2017).
29. Centre d'Information des Viandes. Internet: <http://www.lessentieldesviandes-pro.org> (accessed 08/03/2017).
30. Kongkachuichai R, Napatthalung P, Charoensiri R. Heme and Nonheme Iron Content of Animal Products Commonly Consumed in Thailand. *J Food Compos Anal* 2002;15(4):389-98. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/jfca.2002.1080>.
31. Armah SM, Carriquiry A, Sullivan D, Cook JD, Reddy MB. A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults. *J Nutr* 2013;143(7):1136-40. doi:

10.3945/jn.112.169904.

32. Hallberg L, Hulthen L. Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron. *Am J Clin Nutr* 2000;71(5):1147-60.
33. Miller LV, Krebs NF, Hambidge KM. A mathematical model of zinc absorption in humans as a function of dietary zinc and phytate. *J Nutr* 2007;137(1):135-41.
34. Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, Paineau D, Huneau J-F. Evaluation of a diet quality index based on the probability of adequate nutrient intake (PANDiet) using national French and US dietary surveys. *PLoS One* 2012;7(8):e42155.
35. Anses. Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles - www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf. Rapport d'expertise collective 2016
36. de Boer J, Schösler H, Aiking H. "Meatless days" or "less but better"? Exploring strategies to adapt Western meat consumption to health and sustainability challenges. *Appetite* 2014;76:120-8.
37. Poquet D, Chambaron-Ginhac S, Issanchou S, Monnery-Patris S. Interroger les représentations sociales afin d'identifier des leviers en faveur d'un rééquilibrage entre protéines animales et végétales : approche psychosociale. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 2017;52(4):193-201. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cnd.2017.05.002>.
38. Reynolds LP, Wulster-Radcliffe MC, Aaron DK, Davis TA. Importance of Animals in Agricultural Sustainability and Food Security. *J Nutr* 2015;145(7):1377-9. doi: 10.3945/jn.115.212217.
39. Wolfe RR, Baum JI, Starck C, Moughan PJ. Factors contributing to the selection of dietary protein food sources. *Clin Nutr* 2018;37(1):130-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.clnu.2017.11.017>.
40. Harvard School of Public Health. Healthy Eating Plate vs. USDA's MyPlate - <https://www.hsph.harvard.edu/nutritionsource/healthy-eating-plate-vs-usda-myplate/> (accessed on 05/30/2018). 2018.
41. Richter CK, Skulas-Ray AC, Champagne CM, Kris-Etherton PM. Plant Protein and Animal Proteins: Do They Differentially Affect Cardiovascular Disease Risk? *Adv Nutr* 2015;6(6):712-28. doi: 10.3945/an.115.009654.
42. Anses. Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras -

<https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2006sa0359Ra.pdf>. Rapport d'expertise collective 2011.

43. Tapsell LC, Neale EP, Satija A, Hu FB. Foods, Nutrients, and Dietary Patterns: Interconnections and Implications for Dietary Guidelines. *Adv Nutr* 2016;7(3):445-54. doi: 10.3945/an.115.011718.

44. Akkoyunlu S, Manfredotti C, Cornuéjols A, Darcel N, Delaere F. Investigating substitutability of food items in consumption data. *Second International Workshop on Health Recommender Systems*, 2017:27.

Supplemental Table 1. Socio-demographic characteristics and food groups intake of men and women in the INCA2 population ($n=1,678$).

	Men ($n=717$)	Women ($n=961$)
Age¹ (%)		
18-24	14.1	15.0
25-34	18.7	23.4
35-49	35.2	33.0
50-65	31.9	28.6
Body Mass Index (%)		
≤ 25	59.8	76.1
25 < BMI ≤ 30	30.9	18.1
> 30	9.3	5.8
Size of agglomeration (%)		
≤ 2,000	29.5	20.2
> 2,000 - 20,000	15.4	17.1
> 20,000 - 100,000	11.1	15.8
> 100,000	25.2	32.9
Paris agglomeration	18.8	13.4
Occupational category (%)		
Farmer	3.0	2.0
Craft and related trades workers	7.3	5.8
Managers and higher intellectual occupations	12.9	15.7
Intermediate occupations	16.3	19.0
Service and sales workers	9.4	15.5
Manual workers	30.7	20.3
Retirees	18.6	17.2
Other non-economically active	1.87	4.6
Food groups intake² (g/j)		
Bread and bread products	149.0 ± 87.9	102.1 ± 52.3
Breakfast cereals	8.6 ± 27.9	12.8 ± 27.1
Pastas	169.2 ± 130.6	119.8 ± 87.3
Rice or wheat	110.7 ± 111.5	81.4 ± 76.0
Other cereals	2.7 ± 23.0	3.2 ± 25.0
Viennoiserie	40.5 ± 54.8	33.7 ± 37.8
Sweet or savory cookies and bars	28.0 ± 41.8	25.3 ± 28.6
Pastries and cakes	117.5 ± 120.7	114.8 ± 84.9
Milk	108.9 ± 165.6	112.3 ± 138.0
Dairy products	125.3 ± 115.3	129.9 ± 77.8
Cheese	60.7 ± 40.6	46.5 ± 31.9
Eggs and derivatives	67.4 ± 83.6	66.6 ± 63.9
Butter	16.3 ± 14.2	13.8 ± 9.7
Oil	14.5 ± 12.3	16.4 ± 10.8
Margarine	4.8 ± 9.1	5.7 ± 7.9
Other fat	0.5 ± 3.6	0.2 ± 1.5
Lean meat (excl. poultry)	96.6 ± 93.5	72.0 ± 66.2
High-fat meat (excl. poultry)	118.5 ± 84.8	89.4 ± 59.4

Lean poultry and game	62.4 ± 91.2	44.8 ± 55.1
High-fat poultry and game	103.4 ± 133.0	66.9 ± 86.2
Offal	16.2 ± 48.8	13.9 ± 35.4
Delicatessen meat	90.5 ± 60.1	63.5 ± 40.9
Lean fish	69.9 ± 82.4	61.7 ± 64.5
Fatty fish	43.9 ± 74.9	46.6 ± 59.1
Crustaceans and mollusks	20.6 ± 43.8	20.2 ± 35.5
Vegetables (excl. potatoes)	165.7 ± 86.8	164.1 ± 72.6
Potatoes and related	167.7 ± 107.8	134.9 ± 78.7
Legumes	57.0 ± 104.3	40.8 ± 73.8
Fruit	170.7 ± 156.6	183.1 ± 128.4
Dried fruits and oilseeds	11.8 ± 27.6	8.1 ± 16.8
Ice cream and frozen desserts	31.6 ± 62.6	35.1 ± 52.4
Chocolate	18.5 ± 35.7	17.4 ± 27.2
Sugars and derivatives	24.0 ± 23.3	24.3 ± 20.6
Water	787.6 ± 568.1	826.8 ± 530.6
Nonalcoholic soft drinks	261.1 ± 299.9	214.2 ± 205.6
Alcoholic beverages	351.2 ± 338.0	152.7 ± 199.1
Coffee	326.1 ± 312.2	272.5 ± 292.5
Other hot drinks	104.4 ± 189.1	216.6 ± 267.1
Pizzas, quiches and salted pastries	147.6 ± 177.5	108.7 ± 127.1
Sandwiches, snacks	99.0 ± 142.2	63.8 ± 92.9
Soups and broths	150.7 ± 212.6	192.5 ± 195.0
Prepared dishes	243.2 ± 188.5	178.4 ± 121.0
Desserts, puddings and milk jelly	83.3 ± 101.9	75.0 ± 74.4
Stewed fruit and compote	36.9 ± 77.3	57.5 ± 88.4
Condiments and sauces	33.4 ± 27.3	29.8 ± 18.5
Foods intended for particular nutritional uses	2.4 ± 26.3	2.5 ± 27.4

¹ Percentage of men and women in the categories of age, body mass index, size of agglomeration and occupational category.

² Food groups intake are presented as means ± SDs.

Supplemental Table 2. Percentage of food items considered as “protein foods” by food group of the INCA2 nomenclature.

Food groups	Number of protein food items¹ (as % of total food items in the food group)
Bread and bread products	18 (72%)
Breakfast cereals	5 (21%)
Pastas	3 (60%)
Rice or wheat	2 (50%)
Other cereals	1 (25%)
Viennoisery	1 (8%)
Sweet or savory cookies and bars	1 (3%)
Pastries and cakes	4 (9%)
Milk	15 (71%)
Dairy products	36 (59%)
Cheese	91 (87%)
Eggs and derivatives	11 (85%)
Butter	0 (0%)
Oil	0 (0%)
Margarine	0 (0%)
Other fat	1 (17%)
Meat	35 (100%)
Poultry and game	23 (100%)
Offal	15 (88%)
Delicatessen meat	53 (96%)
Fish	71 (93%)
Crustaceans and mollusks	18 (90%)
Vegetables (excl. potatoes)	10 (10%)
Potatoes and related	2 (17%)
Legumes	10 (91%)
Fruit	0 (0%)
Dried fruits and oilseeds	8 (32%)
Ice cream and frozen desserts	0 (0%)
Chocolate	0 (0%)
Sugars and derivatives	0 (0%)
Water	0 (0%)
Nonalcoholic soft drinks	1 (2%)
Alcoholic beverages	0 (0%)
Coffee	1 (14%)
Other hot drinks	3 (27%)
Pizzas, quiches and salted pastries	17 (81%)
Sandwiches, snacks	29 (100%)
Soups and broths	6 (32%)
Prepared dishes	69 (88%)
Desserts, puddings and milk jelly	13 (41%)
Stewed fruit and compote	0 (0%)
Condiments and sauces	0 (0%)
Foods intended for particular nutritional uses	6 (37%)

¹Some foods were excluded as they were ingredients (e.g. gelatin) (n = 9), or were considered to be too expensive (e.g. lobster) (n = 6). Finally, 564 protein foods were accounted for in the models.

Supplemental Method 1. Implementation of the PANDiet score to the present study. The PANDiet score, expressed as the average of an adequacy subscore (accounting for 27 nutrients), and a moderation subscore (accounting for six nutrients, plus 12 potential penalty values). DHA and EPA + DHA are weighted by 1/2 as DHA is counted twice. Niacin equivalents were calculated as the sum of dietary niacin and 1/60 dietary tryptophan. The upper reference value for sugars excludes lactose. The tolerable upper intake limit for vitamin A concerns retinol only. ALA, Alpha Linolenic Acid. bw, body weight. DHA, Docosahexaenoic Acid. EIEA, Energy Intake Excluding Alcohol. EPA, Eicosapentaenoic acid. LA, Linoleic Acid. NE, Niacin Equivalent. SFA, Saturated Fatty Acid.

PANDiet score
Average of Adequacy and Moderation subscores

Adequacy subscore			
Nutrient	Reference value (/day)	Variability	Source
Protein	0.66 g/kg bw	12.5%	(1)
LA	3.08% EIEA	15%	(3)
ALA	0.769% EIEA	15%	(3)
DHA	0.192 g	15%	(3)
EPA + DHA	0.385 g	15%	(3)
Fiber	23 g	15%	(2)
Vitamin A	570 or 490 µg	15%	(2)
Thiamin	0.3 mg/1000 kcal	20%	(4)
Riboflavin	1.3 mg	15%	(5)
Niacin	5.44 mg NE/1000kcal	10%	(2)
Panathotic acid	3.62 or 2.94 mg	30%	(2)
Vitamin B-6	1.5 or 1.3 mg	10%	(6)
Folate	250 µg	15%	(2)
Vitamin B-12	3.33 µg	10%	(2)
Vitamin C	90 mg	10%	(2)
Vitamin D	10 µg	25%	(2)
Vitamin E	5.8 or 5.5 mg	40%	(2)
Calcium	860 (<= 24 y.o) or 750 (>24 y.o.)	15% or 13%	(2)
Copper	1.0 or 0.8 mg	15%	(2)
Iodine	107 µg	20%	(2)
Bioavailable iron	See formula in de Gavelle et al. (de Gavelle et al. 2018)		(2)
Magnesium	5 mg/kg bw	15%	(2)
Manganese	1.56 or 1.39 mg	40%	(2)
Phosphorus	Calcium (mmol) / 1.65 c.f. phosphorus section in de Gavelle et al. (de Gavelle et al. 2018)	7.5% + CV Calcium (mg)	(8)
Potassium	2692 mg	15%	(9)
Selenium	54 µg	15%	(2)
Bioavailable zinc	0.642 + 0.038 b.w.	10%	(2)

Moderation subscore			
Nutrient	Reference value (/day)	Variability	Source
Protein	2.2 g/kg bw	12.5%	(2)
Total fat	44% EIEA	5%	(2)
SFA	12% EIEA	15%	(3)
Carbohydrates	60.5% EIEA	5%	(2)
Sugars	100 g	15%	(2)
Sodium	3312 or 2483 mg	30%	(2)

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

The modifications of the PANDiet score from the previous version (7), are as follows:

- the cholesterol reference value was removed from the Moderation sub-score of the PANDiet score, as no reference value was set in the most recent opinions by the French (3) or the European Food Safety Authority (EFSA) (10) or in the Dietary Guidelines for Americans (11),
- the reference values for riboflavin and potassium were updated as the EFSA in recent opinions (5, 9), so we updated these references in the PANDiet score,
- the reference values for total fat and carbohydrates were updated to ensure a 97.5% of probability of adequacy for the upper limit of the confidence interval defined by Anses (2), considering a small coefficient of variation of 5%. As a result, for 44% Energy Intake Excluding Alcohol (EIEA) of total fat and 60.5% EIEA of carbohydrates, the probability of adequacy of an individual would be 50%.

Supplemental Method 2. Details about the dual modifications of portions sizes of protein foods.

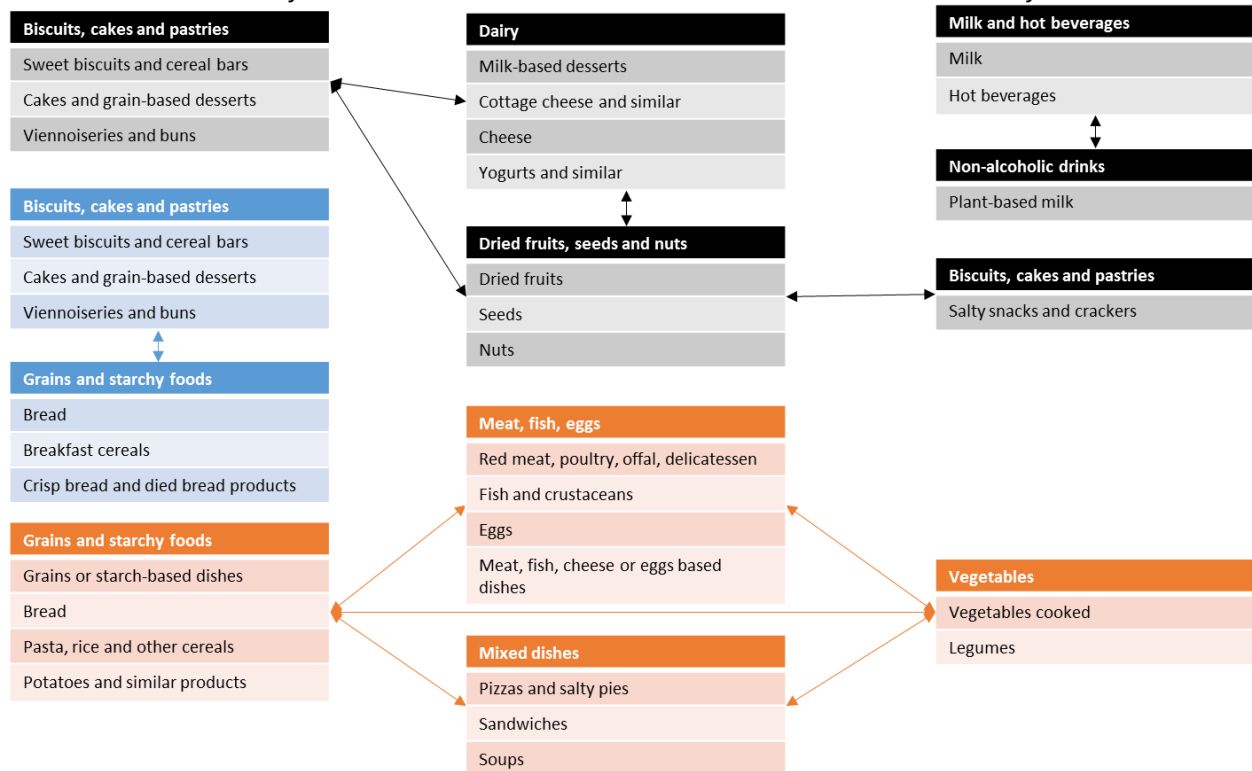
As reported by Bianchi et al. (12), the foods were grouped into “serving size sub-groups” (n = 132), which corresponded to the sets of foods items consumed at the same time in similar amounts. As the models allowed an increase or decrease in the quantity consumed of the protein foods, possible variations in quantity were defined for each sub-group as “portion size steps”. The portion size step for some sub-groups, defined for foods sold in units or packs (e.g. yogurts) (n = 18), was the quantity in one unit or pack. For the other 114 sub-groups, the portion size step was defined as follows:

$$STEP_i = \frac{((P25_i - P10_i) + (P50_i - P25_i) + (P75_i - P50_i) + (P90_i - P75_i))}{4}$$

Each step in the models consisted in decreasing (or increasing) the declared serving size by one portion size step lower (or higher). In M2, the quantity of food introduced from outside the food repertoire was one portion size step. The lowest portion permitted when reducing the portion size was 0 g and the highest portion permitted was defined as the 90th percentile of intake of the serving sub-group. The paired modifications of portions were constrained between food groups that could be substituted according to the French cultural meal scheme (e.g. modifications to portions of meat could not be paired with yogurts). The rules of compatibility between food groups for paired modifications, adapted from Bianchi et al. (Bianchi et al. 2018a), are described in **Supplemental Figure 1**.

Finally, the steps of the model in each individual diet could not lead to an increase or decrease in the initial energy intake of more than 10%, and to protein and indispensable amino acids intakes lower than the Estimated Average Requirement.

Supplemental Figure 1. Diagram presenting the possible paired modifications of portion sizes (one protein food gets a lower portion and one protein food gets a higher portion), depending on the meal, between food subgroups belonging to different food groups. The name of the food group is presented in bold in the first row of each box. The names of the food subgroups belonging to the group are presented from the second row to the last row of the box. The paired modifications are allowed between protein foods within the food groups and with other food groups when an arrow connects two food groups only. The paired modifications of portions of protein foods belonging to food subgroups whose name are written in orange are allowed in lunch and dinner only, those whose name are written in blue are allowed in breakfast only and those whose name is written in black are allowed in every occasion.



Supplemental Table 3. Mean contribution of the main protein containing food categories to protein intake (as % of total protein intake) for the eight clusters of protein food intake identified in the INCA2 population ($n=1,678$), after 20 steps of the stepwise model, in scenarios S1 and S2.

	Meat dishes eaters					Poultry eaters					Pork eaters					Traditional eaters				
	Init ¹	S1 ²	P-value ³	S2 ⁴	P-value ⁵	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value
Lean meat (excl ⁶ poultry)	3.7	5.0	0.0105	3.0	0.1595	4.5	5.8	0.0717	4.3	0.7549	11.1	12.6	0.0915	12.3	0.1996	4.0	5.3	0.0002	3.9	0.952
Fatty meat (excl poultry)	8.5	8.1	0.4911	5.2	<0.0001	7.0	6.2	0.2736	5.3	0.0156	11.7	10.1	0.0307	8.5	<0.0001	5.5	4.7	0.0708	3.7	<0.0001
Lean poultry	3.3	4.5	0.0257	2.6	0.2363	7.1	8.8	0.1493	12.9	<0.0001	2.6	4.0	0.0023	3.2	0.159	4.2	6.3	0.0002	11.5	<0.0001
Fatty poultry	6.4	7.0	0.4478	4.5	0.0109	18.9	18.5	0.7787	15.3	0.0099	4.7	5.6	0.1805	4.2	0.4227	4.4	5.5	0.016	3.4	0.0248
Delicatessen	7.0	3.0	<0.0001	2.6	<0.0001	6.3	3.2	<0.0001	3.3	<0.0001	8.1	4.2	<0.0001	4.2	<0.0001	8.2	4.0	<0.0001	3.8	<0.0001
Lean fish	3.4	4.0	0.2136	2.7	0.1328	2.7	3.1	0.415	2.5	0.7018	3.7	4.1	0.41	3.5	0.6356	4.4	5.0	0.1343	3.7	0.1091
Fatty fish	2.2	2.8	0.0589	6.6	<0.0001	1.4	2.1	0.0904	5.2	<0.0001	2.1	2.7	0.0732	7.5	<0.0001	3.9	4.7	0.0271	6.9	<0.0001
Cheese	6.9	6.2	0.1849	5.0	0.0003	5.7	5.5	0.6256	4.2	0.0044	8.3	8.0	0.602	6.6	0.0018	12.3	11.3	0.0438	9.7	<0.0001
Milk	1.8	1.6	0.7167	1.5	0.3534	1.3	1.3	0.8944	1.3	0.8308	2.5	2.5	0.8526	2.4	0.6807	1.1	1.0	0.6668	1.0	0.4947
Yogurts	3.4	3.3	0.7517	4.5	0.0018	3.7	3.5	0.7339	5.7	<0.0001	3.9	3.6	0.3392	5.4	<0.0001	5.4	5.1	0.364	7.0	<0.0001
Eggs and derivatives	1.9	2.4	0.0109	1.6	0.2076	1.1	1.5	0.0665	1.1	0.757	1.9	2.6	0.0086	2.7	0.0026	2.6	3.0	0.053	2.0	0.0067
Prepared dishes	13.3	13.6	0.806	28.2	<0.0001	5.4	4.8	0.3227	3.9	0.0108	5.1	4.8	0.4151	4.1	0.0147	4.2	3.9	0.4239	2.8	<0.0001
Pizzas, quiches	2.4	3.0	0.1676	3.4	0.0261	3.7	4.1	0.5453	3.7	0.9806	2.1	2.6	0.2396	6.1	<0.0001	2.2	2.7	0.1072	4.2	<0.0001
Sandwiches	1.9	2.0	0.7563	1.2	0.0464	4.0	4.2	0.8039	2.4	0.0136	1.6	1.8	0.4821	1.2	0.19	1.5	1.7	0.2507	1.1	0.0902
Bread	12.4	11.6	0.202	9.5	<0.0001	9.0	8.3	0.3235	7.2	0.0129	11.0	10.7	0.6372	9.0	0.0005	13.8	12.8	0.0406	10.9	<0.0001
Pastas	1.7	2.3	0.003	1.6	0.6155	1.7	2.5	0.0004	1.6	0.7036	2.1	2.9	0.0006	2.1	0.886	1.8	2.5	0.0003	1.6	0.2054
Vegetables	1.9	1.9	0.6812	1.9	0.7526	1.9	1.9	0.9569	1.8	0.4936	2.2	2.3	0.5918	2.6	0.0121	2.7	2.6	0.4042	2.5	0.0241
Legumes	1.0	1.2	0.2679	0.9	0.5548	0.9	1.4	0.1318	5.8	<0.0001	0.7	0.9	0.3169	0.8	0.9166	0.7	0.9	0.2854	5.2	<0.0001
Others	16.8	16.5		13.7		13.7	13.4		12.5		14.6	14.3		13.7		17.3	16.9		15.1	
	Milk drinkers					Take-away eaters					Beef eaters					Fish eaters				
	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value
Lean meat (excl poultry)	5.7	7.6	0.0033	9.4	<0.0001	4.0	4.8	0.3171	7.3	<0.0001	11.2	13.6	0.0037	11.0	0.7624	5.6	7.4	0.0954	5.4	0.8386
Fatty meat (excl poultry)	6.8	7.0	0.7714	5.4	0.0161	6.9	5.9	0.1556	4.4	0.0003	14.1	12.7	0.1143	14.4	0.6719	6.5	6.0	0.5409	4.4	0.0148
Lean poultry	3.6	5.6	<0.0001	5.0	0.0037	1.8	2.9	0.0531	3.3	0.007	2.8	4.2	0.0041	3.6	0.1207	3.4	5.0	0.1268	11.5	<0.0001
Fatty poultry	4.3	5.0	0.1538	4.1	0.6618	3.0	4.3	0.0233	2.2	0.2187	3.2	3.9	0.1611	2.6	0.2039	6.2	6.2	0.9986	4.0	0.0277
Delicatessen	7.1	3.0	<0.0001	3.3	<0.0001	5.6	2.4	<0.0001	2.8	<0.0001	6.8	3.1	<0.0001	3.4	<0.0001	4.9	2.0	<0.0001	2.2	<0.0001
Lean fish	2.7	3.0	0.4059	2.5	0.6324	2.9	3.2	0.5515	2.7	0.6306	3.0	3.3	0.417	2.6	0.1599	7.9	8.6	0.4551	7.3	0.5267
Fatty fish	1.9	2.8	0.0154	7.8	<0.0001	1.8	2.2	0.2834	1.8	0.9227	2.1	2.4	0.2872	6.1	<0.0001	4.6	5.4	0.2437	7.4	<0.0001
Cheese	7.3	6.6	0.1337	5.7	0.0003	7.5	7.0	0.4106	4.9	<0.0001	6.2	6.0	0.5613	4.6	<0.0001	5.8	5.3	0.3802	4.3	0.01
Milk	11.6	11.2	0.3895	10.8	0.1295	2.2	2.0	0.6813	1.8	0.3562	2.3	2.2	0.7134	2.1	0.6095	2.2	2.1	0.9092	2.0	0.7626
Yogurts	4.8	4.3	0.177	5.0	0.5893	2.9	2.6	0.4407	5.1	<0.0001	4.3	4.1	0.5787	6.2	<0.0001	6.5	6.0	0.4229	7.5	0.1108
Eggs and derivatives	2.2	2.5	0.1852	2.0	0.526	2.4	2.8	0.2825	4.1	<0.0001	2.1	2.8	0.0152	2.9	0.0057	1.5	1.9	0.1359	1.2	0.2897
Prepared dishes	5.1	4.4	0.0871	3.4	0.0002	8.5	7.7	0.3852	14.2	<0.0001	4.6	3.9	0.0732	3.0	<0.0001	4.5	3.7	0.2831	2.8	0.0183
Pizzas, quiches	2.7	2.9	0.4573	3.4	0.0504	8.9	10.7	0.0829	11.6	0.0074	3.1	4.0	0.112	7.1	<0.0001	2.3	2.7	0.4655	2.4	0.9584
Sandwiches	2.5	2.3	0.5506	1.6	0.0226	11.3	11.6	0.7408	8.3	0.0042	2.2	2.2	0.9245	1.5	0.0901	1.0	0.9	0.6762	0.6	0.1635
Bread	9.1	8.4	0.1546	7.0	<0.0001	7.4	6.4	0.0573	5.2	<0.0001	11.4	10.7	0.2465	9.3	0.0012	13.4	12.1	0.2841	10.2	0.0069
Pastas	1.8	2.9	<0.0001	2.0	0.4363	2.5	3.4	0.001	2.4	0.8741	2.4	3.1	0.003	2.5	0.6715	1.7	2.7	0.0003	1.5	0.4773
Vegetables	2.1	2.2	0.6771	2.6	<0.0001	1.6	1.5	0.6778	1.3	0.0754	2.0	2.0	0.7994	2.5	0.0003	3.1	3.1	0.905	2.8	0.2925
Legumes	0.6	0.8	0.1469	0.7	0.6735	0.4	0.5	0.3044	0.4	0.7578	0.6	0.9	0.1182	0.7	0.6423	1.0	1.2	0.6124	6.5	<0.0001
Others	18.0	17.4		18.3		18.5	18.0		16.0		15.4	14.9		14.0		18.0	17.5		16.0	

¹ Mean initial contribution of the food group to protein intake.

² Mean contribution of the food group to protein intake in scenario 1 in which dual changes in portion size (i.e. a reduction in one protein food and an increase in another) were only permitted between foods already consumed by the individuals.

³ P-value of the comparisons between the initial situation and after 20 steps in S1 of the contribution of the food groups to total protein intake, adjusted for sex.

⁴ Mean contribution of the food group to protein intake in scenario 2 in which "new" protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belongs (i.e. consumed by >10% of the cluster population).

⁵ P-value of the comparisons between the initial situation and after 20 steps in S2 of the contribution of the food groups to total protein intake, adjusted for sex.

Supplemental Table 4. Mean PANDiet score, Adequacy and Moderation subscores (AS and MS) and mean probabilities of adequacy of the nutrients included in the PANDiet score in the eight clusters of protein dietary intake identified in the INCA2 population ($n=1,678$)¹.

	Meat dishes eaters					Poultry eaters					Pork eaters					Traditional eaters				
	Init ²	S1 ³	P-value ⁴	S2 ⁵	P-value ⁶	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value
PANDiet	64.7	68.3	<0.0001	72.8	<0.0001	63.4	67.3	<0.0001	72.1	<0.0001	63.7	67.4	<0.0001	70.9	<0.0001	64.4	68.2	<0.0001	72.0	<0.0001
AS	64.7	67.4	0.0199	76.2	<0.0001	62.7	65.8	0.022	73.5	<0.0001	64.8	67.6	0.0036	74.2	<0.0001	66.3	69.4	<0.0001	76.3	<0.0001
Protein	96.5	97.2	0.4228	96.6	0.945	93.6	95.5	0.2178	95.4	0.2408	96.5	97.8	0.018	97.6	0.045	97.2	98.1	0.0959	97.9	0.2084
ALA	8.0	8.1	0.9651	6.7	0.4384	8.5	9.0	0.8038	9.1	0.7596	7.5	7.8	0.8824	7.4	0.9238	13.2	13.4	0.9089	12.8	0.8222
LA	59.8	59.4	0.8883	50.3	0.0055	67.4	66.7	0.8503	64.7	0.4392	56.4	55.1	0.6894	52.8	0.2788	60.5	60.0	0.8312	57.1	0.1814
EPA+DHA	27.4	34.0	0.0271	83.9	<0.0001	21.9	28.3	0.0803	70.2	<0.0001	26.4	33.2	0.0108	86.8	<0.0001	40.2	49.8	<0.0001	77.0	<0.0001
DHA	32.2	38.7	0.0355	89.4	<0.0001	27.6	34.6	0.0627	75.8	<0.0001	30.8	38.0	0.0082	90.6	<0.0001	45.4	54.8	0.0001	81.7	<0.0001
Fiber	31.6	35.5	0.264	44.2	0.0003	22.3	27.6	0.1281	40.5	<0.0001	22.0	27.2	0.0481	28.2	0.0187	26.2	31.2	0.0343	43.0	<0.0001
Calcium	51.7	54.2	0.5037	66.1	0.0001	49.5	54.1	0.2724	57.4	0.0586	59.3	63.5	0.1978	74.8	<0.0001	66.4	69.3	0.2123	78.1	<0.0001
Copper	86.3	88.9	0.1077	96.5	<0.0001	79.9	84.1	0.107	95.4	<0.0001	88.5	91.4	0.0263	92.6	0.0017	91.1	93.2	0.0208	98.6	<0.0001
Iron	74.9	77.2	0.2039	91.6	<0.0001	69.9	72.1	0.3172	82.9	<0.0001	72.1	73.9	0.2409	80.2	<0.0001	58.5	61.9	0.0305	76.6	<0.0001
Iodine	54.9	59.7	0.079	77.7	<0.0001	52.1	57.5	0.1392	61.7	0.0086	59.4	64.0	0.057	82.2	<0.0001	62.3	68.3	0.0016	78.2	<0.0001
Potassium	65.3	68.7	0.2749	79.6	<0.0001	66.8	70.4	0.2607	77.4	0.001	70.2	72.7	0.2891	79.7	<0.0001	65.3	69.2	0.0624	77.8	<0.0001
Magnesium	37.1	41.4	0.2115	47.9	0.002	37.4	41.7	0.2905	46.1	0.0346	36.9	41.8	0.1092	45.9	0.0034	42.2	47.7	0.0403	53.8	<0.0001
Manganese	88.2	89.7	0.3076	90.4	0.1376	82.8	84.8	0.2963	88.2	0.0054	86.9	88.9	0.1705	89.4	0.0828	91.7	92.8	0.1624	94.5	0.0008
Phosphorus	100.0	100.0	0.5023	100.0	0.0106	100.0	99.9	0.1522	100.0	0.3883	99.9	99.9	0.6518	100.0	0.2294	99.8	99.8	0.7866	99.9	0.0511
Selenium	91.3	93.4	0.1563	97.6	<0.0001	91.3	93.7	0.1375	99.1	<0.0001	95.6	97.0	0.0598	98.8	<0.0001	94.6	96.4	0.0132	99.3	<0.0001
Zinc	33.7	37.4	0.1726	83.8	<0.0001	32.4	36.9	0.2081	37.6	0.1429	37.0	40.6	0.2318	46.6	0.0016	26.8	31.8	0.028	36.9	<0.0001
Vit.A	69.2	72.1	0.3119	84.8	<0.0001	56.4	60.8	0.2444	68.0	0.0022	66.1	68.7	0.3261	82.5	<0.0001	71.9	73.6	0.4091	79.2	0.0006
Thiamin	98.0	98.0	0.9514	99.5	<0.0001	96.9	96.6	0.5544	99.6	<0.0001	99.0	98.5	0.0183	99.3	0.1432	97.7	97.6	0.7813	99.5	<0.0001
Riboflavin	78.2	81.3	0.1821	90.3	<0.0001	72.7	76.8	0.1493	94.1	<0.0001	78.6	81.8	0.1221	90.5	<0.0001	75.9	78.7	0.1018	95.4	<0.0001
Niacin	100.0	100.0	0.3644	100.0	0.5285	100.0	100.0	0.8232	100.0	0.0343	100.0	100.0	0.8348	100.0	0.9325	100.0	100.0	0.7098	100.0	0.1417
Pantothenic acid	89.6	91.9	0.0845	95.8	<0.0001	90.0	92.6	0.0497	99.3	<0.0001	91.1	93.5	0.0069	96.3	<0.0001	91.6	93.8	0.0014	99.3	<0.0001
Vit.B-6	71.2	78.7	0.0064	88.8	<0.0001	74.1	81.6	0.0039	96.8	<0.0001	72.2	79.1	0.0051	85.1	<0.0001	68.4	77.2	<0.0001	95.3	<0.0001
Folate	64.9	70.6	0.085	74.4	0.0042	58.9	66.2	0.0409	90.9	<0.0001	64.5	70.7	0.0179	81.0	<0.0001	73.1	79.0	0.0008	94.3	<0.0001
Vit.B-12	75.3	83.2	0.0001	92.1	<0.0001	69.7	77.7	0.003	94.1	<0.0001	71.8	79.9	0.0002	92.5	<0.0001	73.2	81.6	<0.0001	94.5	<0.0001
Vit.C	36.3	36.7	0.9173	39.3	0.4633	36.4	36.5	0.9848	36.8	0.9321	33.6	34.8	0.7356	36.1	0.4695	38.5	40.0	0.6012	41.3	0.3398
Vit.D	2.1	3.5	0.1421	5.3	0.0011	2.7	3.5	0.5601	6.9	0.0037	2.5	4.2	0.0979	6.2	0.0003	3.8	5.9	0.0194	6.9	0.0005
Vit.E	86.3	88.1	0.2791	92.9	<0.0001	89.1	90.2	0.4643	90.5	0.3494	86.8	88.2	0.3828	92.3	0.0005	90.7	92.1	0.1777	93.1	0.0226
MS	64.8	69.1	<0.0001	69.4	<0.0001	64.1	68.7	<0.0001	70.7	<0.0001	62.5	67.3	<0.0001	67.7	<0.0001	62.5	66.9	<0.0001	67.7	<0.0001
Protein	98.4	98.7	0.5215	99.7	0.0048	98.9	98.7	0.4449	99.9	0.001	98.8	99.1	0.2853	99.7	0.0017	97.7	98.2	0.2379	99.5	<0.0001
Carbohydrates	98.6	99.0	0.2369	99.4	0.0082	98.3	98.8	0.4639	98.8	0.3954	99.5	99.5	0.8245	99.6	0.5397	98.9	99.3	0.1891	99.4	0.117
Sugar	74.0	74.1	0.9754	71.8	0.4924	65.6	66.0	0.9052	65.4	0.9694	70.2	70.9	0.8169	69.4	0.8025	71.6	72.1	0.8194	71.6	0.9851
Total fat	87.9	93.6	0.0005	96.2	<0.0001	86.4	93.9	0.0003	95.9	<0.0001	81.0	89.3	0.0002	91.1	<0.0001	80.8	90.7	<0.0001	93.8	<0.0001
SFA	26.0	37.8	0.0002	40.7	<0.0001	26.4	36.1	0.0067	43.3	<0.0001	14.9	25.2	<0.0001	27.0	<0.0001	17.9	27.5	<0.0001	30.2	<0.0001
Sodium	10.3	16.6	0.001	13.9	0.0542	16.1	23.0	0.0088	26.0	0.0002	14.2	21.3	0.001	22.1	0.0003	9.7	15.0	0.0005	14.9	0.0006

	Milk drinkers					Take-away eaters					Beef eaters					Fish eaters				
	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value	Init	S1	P-value	S2	P-value
PANDiet	65.5	69.0	<0.0001	72.1	<0.0001	59.8	63.3	<0.0001	66.8	<0.0001	64.2	67.7	<0.0001	71.5	<0.0001	67.1	70.5	0.0002	74.6	<0.0001
AS	67.9	70.4	0.0068	75.6	<0.0001	58.2	61.4	0.0152	68.1	<0.0001	63.1	65.8	0.0074	72.4	<0.0001	68.1	70.4	0.1671	77.5	<0.0001
Protein	98.4	98.6	0.6021	98.7	0.4874	97.1	98.2	0.143	97.7	0.4449	97.4	97.9	0.3561	97.9	0.2699	96.7	98.5	0.0251	98.4	0.0314
ALA	7.9	7.9	0.9875	7.9	0.9863	6.4	6.7	0.834	5.2	0.3149	7.0	6.7	0.8892	6.5	0.7739	19.5	21.1	0.6915	20.7	0.7625
LA	53.7	53.1	0.842	50.9	0.3709	52.4	52.9	0.8839	74.9	<0.0001	56.1	54.7	0.6636	51.9	0.1987	69.8	69.9	0.9694	68.3	0.7398
EPA+DHA	21.7	30.9	0.0016	77.6	<0.0001	18.8	23.6	0.1424	22.6	0.2416	24.0	28.8	0.1141	72.4	<0.0001	49.0	55.9	0.0792	84.0	<0.0001
DHA	25.8	34.6	0.0039	81.3	<0.0001	22.1	27.5	0.1223	26.4	0.2176	28.1	33.0	0.1169	76.8	<0.0001	57.3	63.6	0.1008	89.1	<0.0001
Fiber	20.3	24.3	0.1022	22.5	0.3819	13.4	18.1	0.0471	18.0	0.0539	19.5	23.7	0.0986	24.9	0.0341	38.7	41.0	0.6354	54.9	0.001
Calcium	87.2	87.8	0.7475	92.1	0.0074	58.3	63.5	0.1262	73.3	<0.0001	50.2	54.7	0.1303	70.4	<0.0001	61.7	64.0	0.6606	67.9	0.2335
Copper	84.1	87.8	0.0431	90.7	0.0003	82.1	86.1	0.0739	87.4	0.0179	83.1	86.8	0.0592	87.4	0.0297	90.6	92.1	0.4365	98.9	<0.0001
Iron	64.3	66.9	0.1217	77.0	<0.0001	55.5	58.1	0.2265	68.1	<0.0001	76.0	78.4	0.1164	86.2	<0.0001	61.5	64.7	0.2139	79.0	<0.0001
Iodine	80.2	82.8	0.136	89.6	<0.0001	56.5	61.2	0.1057	75.5	<0.0001	56.5	61.7	0.0372	79.4	<0.0001	66.8	69.8	0.4101	79.8	0.0005
Potassium	66.7	69.5	0.2647	77.6	<0.0001	49.8	53.1	0.3364	64.8	<0.0001	64.5	67.4	0.2687	75.1	<0.0001	68.5	71.0	0.5877	76.7	0.0814
Magnesium	39.7	45.1	0.0661	47.6	0.0079	31.7	35.9	0.2495	42.9	0.0021	37.3	41.1	0.2073	46.1	0.0038	47.9	51.6	0.4761	57.4	0.0717
Manganese	84.4	86.7	0.1351	85.9	0.3038	83.7	86.4	0.1272	85.6	0.2952	85.4	87.5	0.1548	87.8	0.098	92.1	93.0	0.5695	94.5	0.1309
Phosphorus	100.0	100.0	0.3131	100.0	0.3183	99.8	99.9	0.0941	100.0	0.0009	99.7	99.7	0.936	99.8	0.8253	99.9	99.9	0.2693	100.0	0.2572
Selenium	94.4	96.5	0.0111	98.8	<0.0001	91.0	94.1	0.0319	97.6	<0.0001	92.9	95.0	0.0527	98.2	<0.0001	95.7	97.2	0.1654	99.2	0.0017
Zinc	40.2	44.6	0.1283	55.3	<0.0001	32.6	37.1	0.1911	53.1	<0.0001	47.7	53.4	0.0379	62.5	<0.0001	23.3	26.1	0.4891	30.3	0.0794
Vit.A	71.2	72.8	0.5039	85.8	<0.0001	53.9	58.7	0.1758	74.6	<0.0001	53.3	57.0	0.2247	72.3	<0.0001	70.1	73.0	0.526	76.8	0.1473
Thiamin	99.4	99.3	0.2804	99.6	0.2332	96.6	96.3	0.6613	98.3	0.011	96.6	96.4	0.7028	97.9	0.0192	97.0	96.1	0.3532	99.6	0.0062
Riboflavin	91.6	92.7	0.3919	96.2	0.0003	68.0	71.6	0.2015	85.9	<0.0001	75.2	78.2	0.1754	88.6	<0.0001	72.0	75.4	0.3789	93.0	<0.0001
Niacin	100.0	100.0	0.2866	100.0	0.8603	100.0	100.0	0.166	100.0	0.6201	100.0	100.0	0.2064	100.0	0.6022	100.0	100.0	0.0318	100.0	0.597
Pantothenic acid	96.2	97.4	0.0254	98.7	<0.0001	83.0	86.2	0.0549	94.3	<0.0001	90.6	92.9	0.0178	95.1	<0.0001	90.3	91.4	0.5647	99.2	<0.0001
Vit.B-6	71.8	78.9	0.0034	85.4	<0.0001	50.0	58.3	0.0169	77.5	<0.0001	70.9	76.9	0.0191	82.0	<0.0001	70.8	76.1	0.1764	95.5	<0.0001
Folate	70.2	75.7	0.039	83.4	<0.0001	52.7	60.6	0.016	64.8	0.0002	56.6	64.0	0.009	76.9	<0.0001	71.9	75.4	0.3722	92.5	<0.0001
Vit.B-12	84.7	89.6	0.0012	96.0	<0.0001	64.9	71.8	0.0261	83.4	<0.0001	78.3	84.8	0.0001	93.8	<0.0001	66.6	75.6	0.0197	94.0	<0.0001
Vit.C	41.9	42.2	0.9495	42.6	0.8517	26.6	27.0	0.9148	27.3	0.8651	31.9	32.5	0.8685	32.6	0.8377	47.1	48.2	0.8368	49.4	0.6782
Vit.D	3.1	6.5	0.0072	10.3	<0.0001	1.7	2.4	0.294	2.4	0.3175	2.9	4.1	0.2752	4.0	0.3025	2.9	4.0	0.4182	4.7	0.1813
Vit.E	90.1	90.8	0.5744	93.5	0.0082	84.9	86.5	0.3595	92.0	<0.0001	83.3	85.0	0.3254	89.5	0.0002	94.6	95.5	0.5556	95.5	0.5391
MS	63.0	67.6	<0.0001	68.6	<0.0001	61.3	65.3	<0.0001	65.6	<0.0001	65.4	69.6	<0.0001	70.5	<0.0001	66.2	70.5	0.0011	71.7	<0.0001
Protein	98.2	98.4	0.7913	99.5	0.0298	97.1	97.4	0.6456	99.3	0.0019	98.1	98.6	0.2722	99.5	0.0017	97.9	97.3	0.552	99.6	0.0532
Carbohydrates	99.0	99.0	0.9571	99.0	0.8758	96.7	98.0	0.1224	98.6	0.0243	98.0	98.2	0.6032	98.7	0.1581	99.2	98.8	0.2898	99.1	0.6901
Sugar	68.9	70.9	0.5066	70.3	0.6425	60.6	61.0	0.9287	59.5	0.7641	72.7	73.0	0.8995	71.6	0.7122	64.9	66.4	0.7307	65.8	0.8266
Total fat	86.5	94.0	<0.0001	96.0	<0.0001	86.0	93.2	<0.0001	95.4	<0.0001	85.6	93.1	<0.0001	95.5	<0.0001	87.6	93.8	0.0044	96.4	<0.0001
SFA	13.0	22.8	<0.0001	23.1	<0.0001	15.1	23.7	0.0006	26.9	<0.0001	23.2	32.8	0.0006	35.6	<0.0001	34.0	43.4	0.0554	46.6	0.0107
Sodium	12.5	20.8	<0.0001	24.6	<0.0001	12.4	17.5	0.022	15.3	0.1982	15.7	22.9	0.0012	23.9	0.0002	14.8	22.4	0.0121	23.6	0.0037

¹ ALA, Alpha-linolenic acid. AS, Adequacy Sub-score. EPA + DHA, Eicosapentaenoic acid + Docosahexaenoic acid. LA, Linoleic acid. MS, Moderation Sub-score. SFA, Saturated Fatty Acids. Vit, Vitamin.

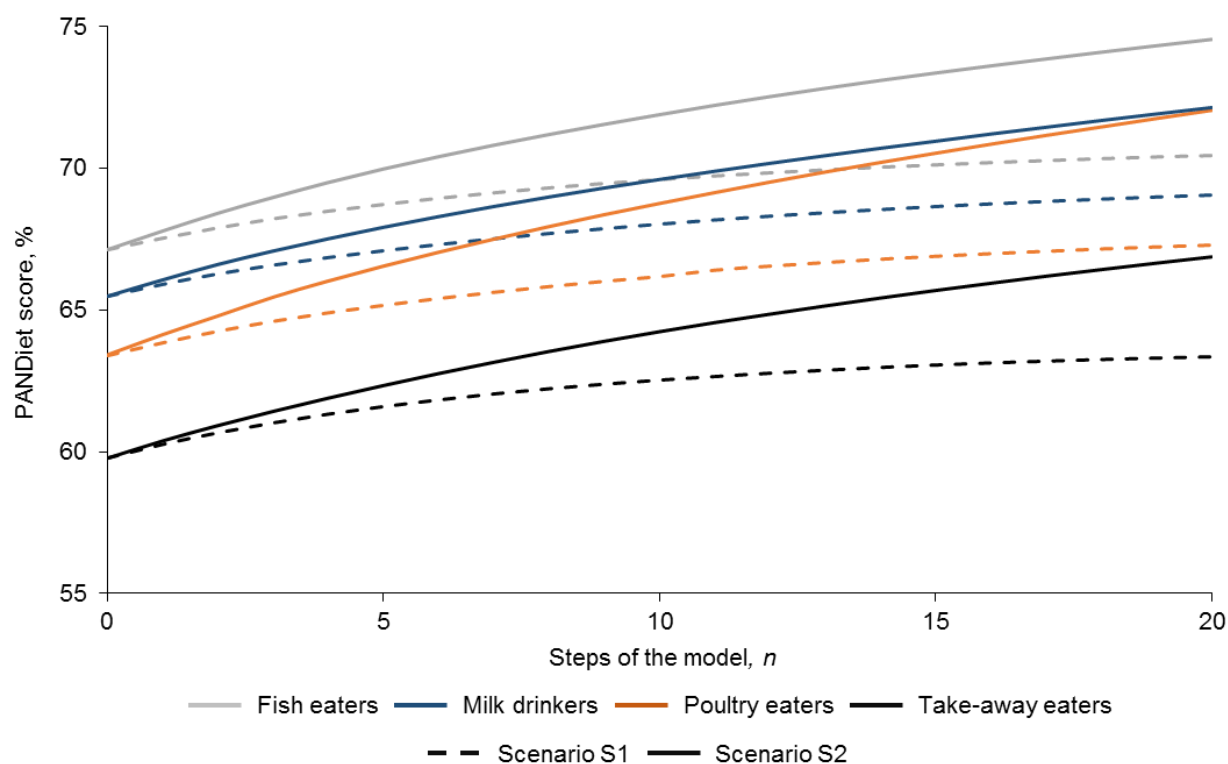
² Mean initial PANDiet, AS, MS or probability of adequacy.

³ Scenario 1 in which dual changes in portion size (i.e. a reduction in one protein food and an increase in another) were only permitted between foods already consumed by the individuals.

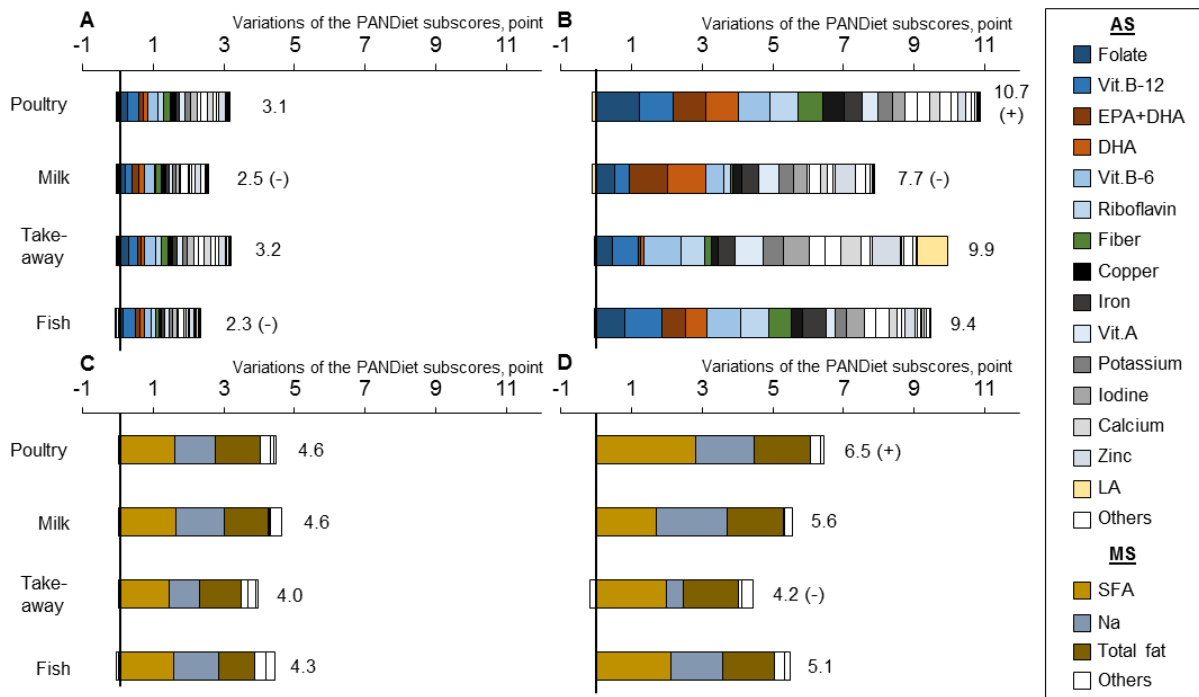
⁴ P-value of the comparisons between the initial situation and after 20 steps in S1 of the PANDiet scores, AS and MS sub-scores and the probabilities of adequacy, adjusted for sex.

⁵ Scenario 2 in which "new" protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belonged (i.e. consumed by >10% of the cluster population)..

⁶ P-value of the comparisons between the initial situation and after 20 steps in S2 of the PANDiet scores, AS and MS sub-scores and the probabilities of adequacy, adjusted for sex.



Supplemental Figure 2. Mean increases of PANDiet along the 20 steps of the stepwise model in the scenarios S1 and S2 for four of the eight clusters of protein food intake in the INCA2 population ($n=1,678$). In Scenario S1, dual changes in portion size (i.e. a reduction in one protein food and an increase in another) were only permitted between foods already consumed by the individuals, and in Scenario S2 “new” protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belonged (i.e. consumed by >10% of the cluster population).



Supplemental Figure 3. Mean variations of the Adequacy Subscore (AS, A and B) and the Moderation Subscore (MS, C and D) according to scenarios S1 (A and C) and S2 (B and D) as compared with the observed diet, for 4 of the 8 clusters, and the contribution of the probabilities of adequacy (PA) of the nutrients in the INCA2 population ($n=1,678$). In S1 (Scenario 1), dual changes in portion size (i.e. a reduction in one protein food and an increase in another) were only permitted between foods already consumed by the individuals, and in S2 (Scenario 2) “new” protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belonged (i.e. consumed by >10% of the cluster population). (+) or (-), significantly higher or lower than the mean increment of the overall population ($P < 0.05$). For example, in S2 the probability of adequacy of the AS increased by 10.7 (from 62.7 to 73.5) among ‘Poultry eaters’, and the increase was significantly higher than in the overall population. The increase of the probability of adequacy for folate intake contributed to 1.2 of the 10.7 points of the increase of the AS sub-score. The PA that accounted for <0.5 to the increments of AS or MS were represented in white. DHA and EPA+DHA were weighted as $\frac{1}{2}$ each in the AS as DHA is in both PAs. DHA, Docosahexaenoic Acid; EPA, Eicosapentaenoic acid; LA, Linoleic Acid; SFA, Saturated Fatty Acid; Vit., Vitamin.

Supplemental Table 5. Example of an individual food record of the INCA2 population before and after 20 steps in the scenario S2.

Day	Meal	Food consumed	Init ¹	S2 ²	Portion ³	Day	Meal	Food consumed	Init	S2	Portion
1	Breakfast ⁴	Bread, French bread, baguette	60	60	23.75	5	Breakfast	Bread, French bread, baguette	30	30	23.75
1	Breakfast	Butter, 82% fat, unsalted	5	5	.	5	Breakfast	Butter, 82% fat, unsalted	2.5	2.5	.
1	Breakfast	Coffee with milk or white coffee or cappuccino, instant coffee or not, without sugar, ready-to-drink	300	300	.	5	Breakfast	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	300	300	.
1	Breakfast	Jam or marmalade	20	20	.	5	Breakfast	Milk, semi-skimmed, UHT	24	24	81.5
1	Breakfast	Breakfast cereals, popped or puffed wheat grain, with honey or caramel, fortified with vitamins and chemical elements	45	45	.	5	Breakfast	Jam or marmalade	10	10	.
1	Breakfast	Sugar, white	5	5	.	5	Breakfast	Breakfast cereals, popped or puffed wheat grain, with honey or caramel, fortified with vitamins and chemical elements	45	45	.
1	Lunch	White sausage (white pudding), sautéed	50	50	37.5	5	Breakfast	Sugar, white	5	5	.
1	Lunch	Béchamel sauce	37.5	37.5	.	5	Lunch	Bread, French bread, baguette	60	60	23.75
1	Lunch	Pear, pulp and peel, raw	306	306	.	5	Lunch	Cheese	15	15	16.15
1	Lunch	Raisin	7	7	.	5	Lunch	Butter, 82% fat, unsalted	5	5	.
1	Lunch	Water, municipal	300	300	.	5	Lunch	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.
1	Lunch	Carrot, cooked	100	100	.	5	Lunch	Water, municipal	240	240	.
1	Lunch	Garden peas, cooked	175	175	31.25	5	Lunch	Yoghurt with whole milk, fruit, sweet	125	125	125
1	Dinner	Wine, white, 11°	600	600	.	5	Lunch	Trout, farmed, smoked	20	20	35.62
1	Dinner	Bread, French bread, baguette	180	180	23.75	5	Lunch	Sugar, white	6.5	6.5	.
1	Dinner	Fish Quenelle, cooked	120	120	40	5	Afternoon snack	Fruit juice	120	120	.
1	Dinner	Rice, cooked, unsalted	50	50	.	5	Dinner	Clear fruit brandy or eau-de-vie	40	40	.
1	Dinner	Sauce	45	45	.	5	Dinner	Wine, white, 11°	200	200	.
1	Dinner	Sauce	45	45	.	5	Dinner	Wine, red, 11°	200	200	.
1	Dinner	Pineapple, pulp, raw	144	144	.	5	Dinner	Champagne	200	200	.
1	Dinner	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.	5	Dinner	Red wine sauce	30	30	.
1	Dinner	Mineral water	300	300	.	5	Dinner	Saint-Nectaire cheese, from cow's milk	28.5	28.5	14.25
1	Dinner	Water, municipal	300	300	.	5	Dinner	Blueberry, raw	18	18	.
1	Dinner	Asparagus, boiled/cooked in water	40	40	.	5	Dinner	Apple compote	165	165	.
1	Dinner	Pound cake, prepacked	12.5	12.5	.	5	Dinner	Venison (roebeuck), roasted/baked	63	63	33
1	Dinner	Meringue	10	10	.	5	Dinner	Chestnut, grilled	140	140	.
1	Dinner	Canapés (toasts w various toppings)	25	25	18.75	5	Dinner	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.
1	Dinner	Salmon, steamed	190	190	35.62	5	Dinner	Mineral water	300	300	.
1	Dinner	Milk chocolate bar	3	3	.	5	Dinner	Eclair	45	45	.
1	Dinner	Sugar, white	2.5	2.5	.	5	Dinner	Salmon in puff pastry	45 ⁵	155	55
1	Dinner	Epoisses cheese	30	30	12.5	5	Dinner	Canapés (toasts w various toppings)	150	150	18.75
1	Dinner	Saint-Félicien cheese	30	30	12.5	5	Dinner	Salmon, smoked	30	30	12.5
1	Dinner	Goat cheese	10	10	10	5	Dinner	Sugar, white	5	5	.
1	Dinner	Other cheese	15	15	12.5	5	Dinner	Ice-cream or sorbet	180	180	.
2	Breakfast	Bread, French bread, baguette	60	12.5	23.75	5	Dinner	Epoisses cheese	30	30	12.5
2	Breakfast	Butter, 82% fat, unsalted	5	5	.	6	Breakfast	Fruit juice	120	120	.
2	Breakfast	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	300	300	.	6	Breakfast	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	300	300	.
2	Breakfast	Milk, semi-skimmed, UHT	24	24	81.5	6	Breakfast	Milk, semi-skimmed, UHT	24	24	81.5
2	Breakfast	Jam or marmalade	20	20	.	6	Breakfast	Breakfast cereals, popped or puffed wheat grain, with honey or caramel, fortified with vitamins and chemical elements	60	60	.
2	Breakfast	Breakfast cereals, popped or puffed wheat grain, with honey or caramel, fortified with vitamins and chemical elements	30	30	.	6	Breakfast	Sugar, white	5	5	.
2	Breakfast	Sugar, white	5	5	.	6	Lunch	Champagne kir (Cocktail of champagne with red fruit liqueur)	300	300	.
2	Lunch	Tangerine	90	90	.	6	Lunch	Potato, pre-fried into cubes, frozen, cooked	200	200	.
2	Lunch	Water, municipal	240	240	.	6	Lunch	Wine, white, 11°	300	300	.
2	Lunch	Espresso coffee, not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.	6	Lunch	Wine, red, 11°	450	450	.
2	Lunch	French bean, canned, drained	50	50	.	6	Lunch	Bread, French bread, baguette	30	30	23.75

2	Lunch	Candies, all types	5	5	.	6	Lunch	Country-style bread, French bread (baguette or ball)	40	40	30
2	Lunch	Sugar, brown	6.5	6.5	.	6	Lunch	Fourme d'Ambert cheese	60	60	15
2	Lunch	Duck, magret, cooked in pan	72	72	45.1	6	Lunch	Apple compote	40	40	.
2	Lunch	Butter	10	10	.	6	Lunch	Prune	32	32	.
2	Lunch	Butter	5	5	.	6	Lunch	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.
2	Lunch	Olive oil	12	12	.	6	Lunch	Water, municipal	300	300	.
2	Dinner	Cider, dry	360	360	.	6	Lunch	Red cabbage, boiled/cooked in water	200	200	.
2	Dinner	Waffle	175	175	.	6	Lunch	Salmon in puff pastry	60	60	55
2	Dinner	Jam or marmalade	100	100	.	6	Lunch	Canapés (toasts w various toppings)	65	65	18.75
2	Evening snack	Infusion, brewed, without sugar	250	250	.	6	Lunch	Salmon, smoked	30	30	12.5
2	Evening snack	Sugar, white	5	5	.	6	Lunch	Sugar, white	6.5	6.5	.
3	Breakfast	Bread, French bread, baguette	80	80	23.75	6	Lunch	Goose, meat, roasted/baked	500	319.6	45.1
3	Breakfast	Butter, 82% fat, unsalted	5	5	.	6	Lunch	Lentil, cooked	.	300	60
3	Breakfast	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	300	300	.	6	Lunch	Butter	10	10	.
3	Breakfast	Milk, semi-skimmed, UHT	24	24	81.5	6	Lunch	Butter	5	5	.
3	Breakfast	Jam or marmalade	20	20	.	6	Lunch	Cream cake	310	310	.
3	Breakfast	Sugar, white	5	5	.	6	Lunch	Epoisses cheese	30	30	12.5
3	Morning snack	Milk chocolate filled with praline in tablet	3	3	.	6	Afternoon snack	Fruit soft drink, carbonated (less than 10% of fruit juice), with sugar	150	150	.
3	Morning snack	Tea, brewed, without sugar	300	300	.	7	Breakfast	Bread, French bread, baguette	60	60	23.75
3	Morning snack	Sugar, white	5	5	.	7	Breakfast	Butter, 82% fat, unsalted	5	5	.
3	Lunch	Bread, French bread, baguette	30	30	23.75	7	Breakfast	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	300	300	.
3	Lunch	White sausage (white pudding), sautéed	100	100	37.5	7	Breakfast	Milk, semi-skimmed, UHT	24	24	81.5
3	Lunch	Water, municipal	120	120	.	7	Breakfast	Jam or marmalade	20	20	.
3	Lunch	Espresso coffee, not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.	7	Breakfast	Sugar, white	5	5	.
3	Lunch	Natural yogurt	125	125	125	7	Lunch	Milk chocolate filled with praline in tablet	3	3	.
3	Lunch	Broccoli, cooked	175	232.5	57.5	7	Lunch	Champagne	200	200	.
3	Lunch	Sugar, white	10	10	.	7	Lunch	Bread, French bread, baguette	30	30	23.75
3	Lunch	Sugar, white	2.5	2.5	.	7	Lunch	Saint-Nectaire cheese, from cow's milk	38	38	14.25
3	Lunch	Olive oil	12	12	.	7	Lunch	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.
3	Dinner	Beer, regular (4-5° alcohol)	250	250	.	7	Lunch	Red cabbage, boiled/cooked in water	250	250	.
3	Dinner	Bread, French bread, baguette	30	30	23.75	7	Lunch	Sugar, white	6.5	6.5	.
3	Dinner	White sausage (white pudding), sautéed	50	50	37.5	7	Lunch	Goose, meat, roasted/baked	400	354.9	45.1
3	Dinner	Cheese	30	30	16.15	7	Lunch	Spinach, cooked	.	42.5	42.5
3	Dinner	Toasted ham sandwich topped with grated cheese	100	100	55	7	Lunch	Butter	10	10	.
3	Dinner	Chocolate mousse (milk-based), refrigerated	120	120	17.5	7	Lunch	Butter	5	5	.
3	Evening snack	Infusion, brewed, without sugar	250	250	.	7	Lunch	Cream cake	155	155	.
3	Evening snack	Sugar, white	5	5	.	7	Dinner	Champagne kir (Cocktail of champagne with red fruit liqueur)	200	200	.
4	Breakfast	Bread, French bread, baguette	30	30	23.75	7	Dinner	Wine, white, 11°	300	300	.
4	Breakfast	Butter, 82% fat, unsalted	2.5	2.5	.	7	Dinner	Wine, red, 11°	300	300	.
4	Breakfast	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	300	300	.	7	Dinner	Fourme d'Ambert cheese	60	60	15
4	Breakfast	Milk, semi-skimmed, UHT	24	24	81.5	7	Dinner	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.
4	Breakfast	Jam or marmalade	10	10	.	7	Dinner	Red cabbage, boiled/cooked in water	200	200	.
4	Breakfast	Breakfast cereals, popped or puffed wheat grain, with honey or caramel, fortified with vitamins and chemical elements	30	30	.	7	Dinner	Salmon, smoked	30	30	12.5
4	Breakfast	Sugar, white	5	5	.	7	Dinner	Sugar, white	6.5	6.5	.
4	Morning snack	Milk chocolate filled with praline in tablet	3	3	.	7	Dinner	Goose, meat, roasted/baked	500	3.9	45.1
4	Morning snack	Wine, white, 11°	120	120	.	7	Dinner	Spinach, cooked	.	42.5	42.5
4	Lunch	Alcoholic cocktail	120	120	.	7	Dinner	Salmon, steamed	.	178.1	35.6
4	Lunch	Clear fruit brandy or eau-de-vie	35	35	.	7	Dinner	Butter	10	10	.
4	Lunch	Wine, red, 10°	600	600	.	7	Dinner	Butter	5	5	.

4	Lunch	Dried pasta, cooked, unsalted	150	212.5	62.5	7	Dinner	Cream cheese	155	155	.
4	Lunch	Shrimp or prawn, cooked	14.4	14.4	12	7	Dinner	Melted cheese 50% fat	60	60	11.25
4	Lunch	Litchi, pitted, canned	50	50	.						
4	Lunch	Not instant coffee, without sugar, ready-to-drink	70	70	.						
4	Lunch	Sweet corn, on the cob, cooked	13.7	13.75	.						
4	Lunch	Mung bean, sprouted or soy spouts, raw	5	25	.						
4	Lunch	Fruit frit	40	40	.						
4	Lunch	Egg roll or Nem	140	30	55						
4	Lunch	Lentil, cooked	.	180	60						
4	Lunch	Salmon, steamed	.	35.62	35.62						
4	Lunch	Shrimps on skewer	80	80	50						
4	Lunch	Green salad, raw, without seasoning	10	10	.						
4	Lunch	Pork, spare-ribs, braised	65	65	20						
4	Lunch	Sugar, white	5	5	.						
4	Lunch	Nougat	40	40	.						
4	Dinner	Beer, regular (4-5° alcohol)	250	250	.						
4	Dinner	Bread, French bread, baguette	30	30	23.75						
4	Dinner	Tomato sauce, with onions, prepacked	30	30	.						
4	Dinner	Tangerine	90	90	.						
4	Dinner	Onion, cooked	30	30	.						
4	Dinner	Crepe, plain, prepacked, room temperature	50	50	.						
4	Dinner	Turkey, meat, roasted/baked	27	27	45.1						
4	Dinner	Butter	10	10	.						
4	Dinner	Olive oil	12	12	.						
4	Evening snack	Infusion, brewed, without sugar	250	250	.						
4	Evening snack	Sugar, white	5	5	.						

¹ Food intake in the initial situation (g)

² Food intake after 20 steps of the scenario S2

³ Portion size step as defined in Supplemental Method 2 (g). The data are shown for protein food only, which are those manipulated.

⁴ Protein foods were highlighted in light grey.

⁵ Protein foods with modified portion sizes were highlighted in dark grey.

Supplemental references

1. FAO Expert Consultation. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. FAO Food Nutr Pap 2011;92:1-66.
2. Anses. Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles - www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf. Rapport d'expertise collective 2016
3. Anses. Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2006sa0359Ra.pdf>. Rapport d'expertise collective 2011.
4. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary reference values for thiamin. EFSA journal 2016;14(12):4653. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4653.
5. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary Reference Values for riboflavin. EFSA Journal 2017;15(8):e04919. doi: 10.2903/j.efsa.2017.4919.
6. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary Reference Values for vitamin B6. EFSA Journal 2016;14(6):e04485-n/a. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4485.
7. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. Nutrients 2018;10(2):226.
8. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion on dietary references values for phosphorus. EFSA journal 2015;13(7):4185. doi: 10.2903/j.efsa.2015.4185.
9. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific opinion of dietary reference values for potassium. EFSA Journal 2016;14(10):e04592. doi: 10.2903/j.efsa.2016.4592.
10. EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for fats, including saturated fatty acids, polyunsaturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, trans fatty acids, and cholesterol. EFSA Journal 2010;8(3):1461. doi: 10.2903/j.efsa.2010.1461.
11. U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture. 2015–2020 Dietary guidelines for Americans - Available at <http://health.gov/dietaryguidelines/2015/guidelines/> (accessed on 01/03/2018). In: USDA, ed. Washington (DC), 2015.
12. Bianchi CM, Huneau J-F, Barbillon P, Lluch A, Egnell M, Fouillet H, Verger EO, Mariotti F. A clear trade-off exists between the theoretical efficiency and acceptability of dietary changes that improve nutrient adequacy during early pregnancy in French women: Combined data from simulated changes modeling and online assessment survey. PLoS One 2018;13(4):e0194764.

2.5. Travail personnel n°5 : La propension à modifier les tailles de portion ou à introduire de nouveaux aliments dépend largement du profil de consommation protéique

Résumé

Contexte : Des modifications de la consommation de sources de protéines sont en cours dans les pays occidentaux. Promouvoir une évolution de la consommation des sources de protéines vers un rapport protéines animales/végétales plus équilibré est un moyen prometteur d'améliorer la qualité de l'alimentation. Des stratégies existent pour cela, par exemple modifier les tailles de portions ou d'introduire de nouveaux aliments dans les régimes alimentaires individuels, mais on sait peu de choses sur la propension des individus à adopter de tels changements.

Objectif : Notre objectif était d'évaluer la propension à adopter des changements qui permettraient d'améliorer l'adéquation nutritionnelle des régimes alimentaires individuels en modifiant la taille des portions ou en introduisant de nouveaux aliments protéiques.

Méthode : Dans un échantillon représentatif de la population adulte française en 2018 ($n = 2\,055$), nous avons estimé les apports alimentaires en aliments sources de protéines (à l'aide d'un fréquentiel alimentaire) et évalué la propension des individus à consommer des portions plus ou moins importantes d'aliments protéiques (ou à introduire un aliment protéique non consommé). Ces modifications avaient été précédemment identifiées comme améliorant l'adéquation nutritionnelle des régimes. Une régression logistique binomiale a été utilisée pour étudier l'association entre la propension à adopter ces modifications et le type de changement, les habitudes alimentaires actuelles des individus et leurs caractéristiques sociodémographiques.

Résultats : Les participants étaient plus enclins à accepter de consommer des portions plus petites qu'à introduire de nouveaux aliments. Consommer des portions plus importantes était la modification la moins acceptée. La propension à modifier ses habitudes alimentaires dépendait des aliments concernés. Les participants étaient plus enclins à consommer de plus grandes portions ou à introduire les aliments considérés comme sains dans les repères de consommation nationaux. Ils étaient également plus enclins à consommer de plus grandes portions (+42%, $P < 0,0001$) et moins enclins à consommer de plus petites portions (+31%, $P < 0,0001$) lorsqu'ils faisaient partie des consommateurs consommant le plus fréquemment les aliments concernés. Les participants étaient plus enclins à consommer un nouvel aliment s'il était consommé par une large proportion des personnes ayant un régime alimentaire similaire.

Conclusion : La propension à modifier les comportements alimentaires était plus importante en ce qui concerne les changements alimentaires correspondant aux recommandations diététiques, mais elle restait généralement largement tributaire du profil alimentaire protéique des individus, ce qui suggère l'importance de tenir compte des habitudes alimentaires individuelles lors de la formulation de recommandations nutritionnelles.

Valorisation : Ce travail a été soumis à la revue *Nutrition Journal* le 1^{er} avril 2019.

Messages-clés

- Des recommandations de diminuer les tailles de portions semblent plus acceptables qu'introduire de nouveaux aliments, ce qui semble plus acceptable qu'augmenter les tailles de portion.
- Les individus sont plus enclins à consommer de portions plus importantes, ou à introduire des aliments lorsqu'ils sont considérés comme sains dans les recommandations alimentaires.
- Les individus consommant fréquemment un aliment sont enclins à en consommer des portions plus larges et peu enclins à en consommer des portions plus petites.
- Les individus sont plus enclins à introduire un nouvel aliment dans leur répertoire alimentaire lorsque celui-ci est consommé par une large proportion des individus ayant profil de consommation protéique similaire.

Erwan de Gavelle¹ (erwan.degavelle@agroparistech.fr), Olga Davidenko¹
(olga.davidenko@agroparistech.fr), Hélène Fouillet¹ (helene.fouillet@agroparistech.fr), Julien
Delarue² (julien.delarue@agroparistech.fr), Nicolas Darcel¹ (nicolas.darcel@agroparistech.fr),
Jean-François Huneau¹ (jean_francois.huneau@agroparistech.fr), François Mariotti^{1,*}
(francois.mariotti@agroparistech.fr)

² UMR GENIAL Ingénierie Procédés Aliments, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay,
91300, Massy, France

Abstract

Methods. In a representative sample of French adult population in 2018 ($n=2,055$), we analyzed estimates of dietary intakes (using a food frequency questionnaire) and declared willingness to eat smaller or larger portions of protein foods (or to introduce a non-consumed protein food). These modifications had previously been identified as improving the nutrient adequacy of diets. Binomial logistic regression was used to study the association between a willingness to adopt these modifications and the type of change, the current dietary patterns of individuals and their socio-demographic characteristics.

Results. Participants were more likely to accept eating smaller portion sizes than to introduce new foods. Eating larger portion sizes was the least accepted modification. A willingness for

any modification varied, depending on the food groups concerned. Participants were more willing to eat larger portions or to introduce foods that were indeed recommended by dietary guidelines. They were also more willing to eat larger portions (+42%, $P<0.0001$) and less willing to eat smaller portions (+31%, $P<0.0001$) when they were the most frequent consumers of the foods concerned. Participants were more willing to eat a new food if it was consumed in large quantities by individuals with a similar dietary pattern.

Conclusion. A willingness to change dietary behavior was stronger regarding changes corresponding to dietary guidelines but generally remained largely dependent on the protein dietary profile of the individuals, suggesting the importance of taking individual feeding habits into account when issuing nutritional recommendations.

Keywords

Portion size; protein foods; dietary pattern; acceptability of dietary changes.

Background

There has been a shift in dietary protein intake in Western countries since the early 2000s. People have been tending to eat less meat, and particularly less beef (1), for different reasons that depended on the period (2): public health issues, economic issues and, more recently, an increasing awareness of the impacts of high meat consumption on health, the environment or animal welfare (3). Meanwhile, dietary guidelines have encouraged a reduction in meat consumption and an increase in that of plant protein (4, 5), although the public health strategies designed to change dietary behavior in this respect have remained ineffective (6, 7).

Studies have shown that attitudes and beliefs relative to meat (8-10), sensory factors or social norms (11,12) can influence meat intake. Two strategies are often adopted to reduce meat intake: encouraging the replacement of meat with plant protein, or encouraging a downsizing of portions. Both strategies have been found to be effective in reducing meat intake during experimental studies (12, 13). However most declarative studies have shown that portion downsizing was more acceptable than replacing meat (14, 15), even if such strategies are acknowledged as being complementary inasmuch as individuals who consume meat less frequently have also been shown to eat smaller portions (16, 17). In nutritional modeling studies, the problem of ensuring cultural acceptability is classically addressed in a very conservative manner by minimizing the distance between the modeled and observed diets (18). Three studies have used more progressive and adaptive approaches to ensure acceptability by prioritizing changes to portion sizes in individual diets and then introducing new foods if necessary, priority being given to foods frequently consumed by the population (19-21). However the underlying hypotheses concerning the relative acceptability of these changes, although intuitive, have not been validated. Finally, very few studies have explored the dietary changes affecting specific food groups beyond meats in general and some pulses and meat substitutes (22, 23). Moreover, these studies did not consider individual background dietary patterns and did not focus specifically on foods where changes were found to improve nutrient adequacy.

We have previously shown that in order to increase the nutritional adequacy of the diet, the

most effective modifications involved a reduction in processed meat intake and an increase in that of fatty fish, poultry and legumes. However, there were differences depending on the dietary patterns of the individuals (24), since there could be variations to the acceptable food repertoire depending on the individual. Research on recommender systems uses collaborative filtering methods to predict consumer behaviors. Collaborative filtering is based on the hypothesis that individuals who share the same opinion on matter A are likely to share the same opinion on matter B (25). Based on this approach, we hypothesized that introducing a new food into an individual's repertoire would be more acceptable to those belonging to a cluster of consumers who share a similar overall dietary pattern in which this food is highly consumed, rather than individuals belonging to a cluster with a low proportion of consumers. During the present study, using a consumer survey, our objective was to assess the willingness of consumers to modify their portion sizes or to consume new foods as a means of improving nutrient adequacy and in relation to the dietary pattern of individuals.

Population and methods

Population and questionnaire

The data were collected between 9 April and 24 May 2018 using an online questionnaire sent to members of a consumer panel representative of French Internet users aged 18 to 65 years. A total of 2,692 people (1,408 women and 1,284 men) completed the questionnaire. The participants were informed that they would be asked about their willingness to adopt modifications to their dietary habits that would lead to “a more balanced diet”. The questionnaire included items about individual eating habits related to dietary protein sources, the acceptability of changes to portion sizes and socio-demographic characteristics. Three questions on hunger, appetite and the potential consumption of participants were asked, as recommended by Blundell et al. (26), and grouped into an appetite score.

Food intake data

First, participants completed a food frequency questionnaire (FFQ) on their intakes of protein foods. They were asked about their frequency of consumption of protein food groups on a 9-item scale ranging from “never” to “> 3 times/day”. The 29 groups of protein foods considered in the FFQ covered 84% of the total protein intake of the French population in 2006-2007, as detailed in a previous study (24). In addition, they were asked about the usual size of their portions (on a 7-item scale extracted from the S.U.VI.MAX photo book (27)) of 20 protein food groups that they declared they consumed (among the 29 groups). These groups were the ten whose portions increased the most frequently and the ten whose portions decreased most frequently when identifying the optimum individual changes to simulate an increase in nutrient adequacy, as described in the previous study (24). If a food group was not consumed by the participants, they were asked about the portion size of the next food group on the list (the 11th on the list of food groups whose portions were most frequently reduced in size). Portion sizes that were not reported by participants were imputed using the gender-specific mean portion size of this food.

Food group intakes were then estimated by combining frequencies and portion sizes. A partial estimate of individual protein intakes was made by assigning the average protein content of

each food in the same food group as specified in the second French national study on food consumption (INCA2), weighted by the average intake of each food in the diet in the INCA2 study (28). For example, the protein content of the “legumes” food group was estimated as the mean protein content of the 11 different legumes consumed in the INCA2 study, weighted by the mean consumption of each legume.

Willingness to modify food behavior

Willingness to modify the diet was assessed by asking participants to give a score, for each food group, in response to the question “To what extent would you be willing to serve yourself a [smaller/larger, depending on the food] portion when you eat [this food]?” using a 7-point Likert scale from 1 “not at all” to 7 “absolutely”. If a participant declared that they never consumed a food group whose portion size had to be increased, he/she was asked “To what extent would you be willing to eat a portion of [this food] once a week?” (**Figure 1**). There were therefore a total of 10 questions on increasing portion sizes (for the 10 groups whose portions increased the most frequently for improving diet quality as we previously identified in a nutrition modeling study (24)), 10 questions on reducing portion sizes (for the 10 groups whose portions decreased the most frequently) and nine questions on introducing a small portion weekly (from the nine groups whose portions increased the most frequently, if not consumed by the individuals). These questions asked immediately after that concerning the portion size of each food group.

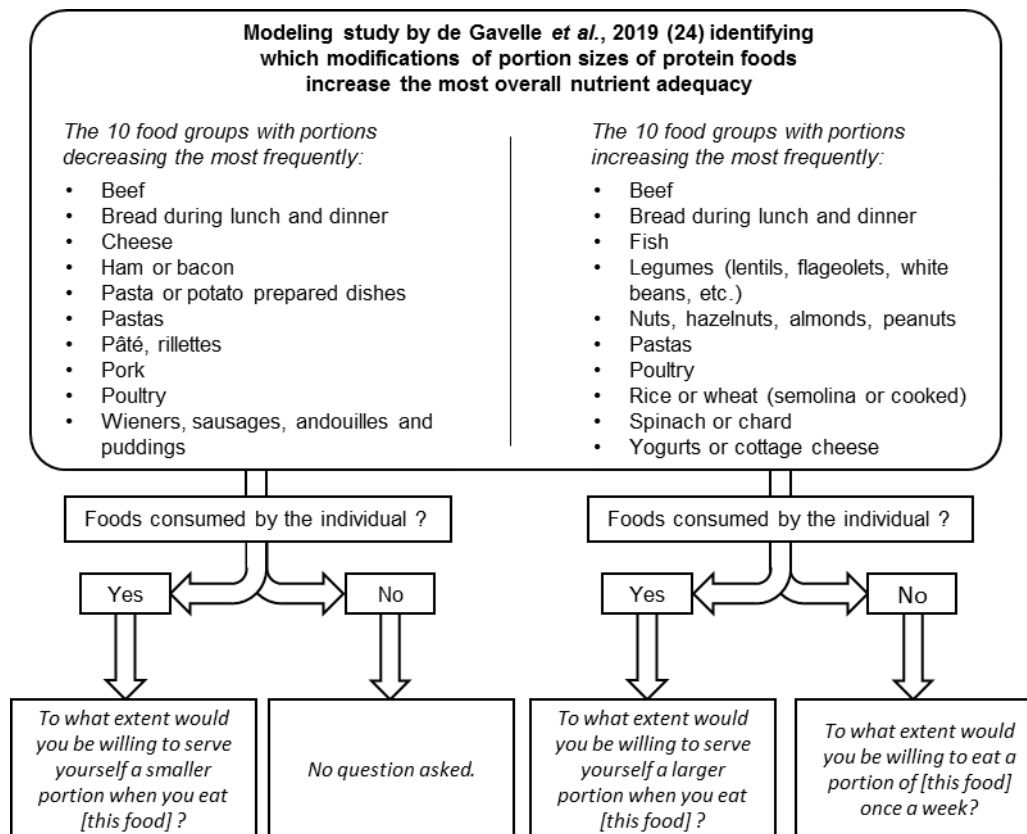


Figure 1. Questions related to a willingness to adopt changes to protein food intake which increase the nutrient adequacy of the diet (from 1 “not at all” to 7 “absolutely”).

Identification of misreports

We identified misreports using a three-step method. First, consistency was checked using four questions on portion sizes that were asked twice in different parts of the questionnaire. A participant was excluded if they declared different portion sizes of the same food more than once (n=195). Second, the plausibility of declared frequencies was tested. If the sum of the declared intake frequencies was <once/day or >20 times/day (respectively, 2.5th and 97.5th percentiles of intake frequency of protein foods in the INCA2 population, as estimated from the dataset), the participant was excluded (n=61). Finally, the plausibility of intakes was tested using the mean intakes reported in the 2014-2015 INCA3 study (29). Given that intakes have been shown to follow a lognormal distribution, if the logarithm of the sum of the intakes declared (per kg body weight) was not between mean +2 SD and mean –2 SD, or if the intake of one food group was higher than the mean intake +3 SD of this food group in, the participant

was excluded. However, an exception was applied for self-declared vegetarians or vegans, who had no upper limit for legumes, nuts and seeds, but were excluded if they declared a meat intake of more than 70g/d (the highest level recommended by the French Food Safety Agency (30)). After excluding all these misreports (n=381), we obtained a final sample of 2,055 individuals (905 men and 1,055 women). The flowchart is detailed in **Additional Figure 1**.

Identification of protein food intake patterns

The contributions of different food groups to the partial protein intake of each individual were used to identify protein food intake patterns, as detailed previously (31). Briefly, non-negative matrix factorization (NMF) (32) was used to identify the factors, which are combinations of protein food groups eaten by individuals with similar diets. The number of factors was chosen using graphic analysis and accounting for the interpretability of the results (33, 34). A k-means clustering was performed on the score for each factor in each individual in order to identify six clusters of individuals with similar dietary patterns. The six clusters thus obtained are presented in detail in **Additional Figure 2**. The clusters were characterized by the intake of one or a few salient food groups: pork eaters, take-away eaters (whose intakes of prepared foods and fast-foods were higher than the overall population), healthy eaters (whose intakes of fish, eggs, whole grain cereals, vegetables, legumes, nuts and seeds were higher than the overall population), poultry eaters, beef eaters and bread and dairy eaters (whose intakes of bread and dairy products were higher than the overall population).

Statistical analyses

We used the Chi-squared method to test the homogeneity of the answers to each type of question (increase, decrease or introduction). As the scores were not normally distributed, binomial logistic regression was used to test how the willingness scores could be explained by the type of question, the protein intake cluster, the food group, the appetite score and socio-demographic characteristics. We considered that individuals with a willingness score higher than the median (for each type of question) were “willing” to modify their diet as suggested in

the question, while individuals with a willingness score below or equal to the median were “not willing” to modify their diet. The median was 3 for questions related to increasing portion size and introducing new foods and 4 for questions related to reducing portion size. Because the interaction between the type of modification and the food group was significant, the analyses were stratified by type. The three final models included the food group, cluster, appetite score, sex, age, socio-professional characteristics, income, BMI, level of education and size of urban area as explanatory variables. The model related to introducing new foods also included the percentage of consumers in the cluster to which the individual belonged, and the models related to increasing or decreasing portion sizes also included the individual’s quartile of frequency of intake and the quartile of portion size (calculated for each food group). Bread was used as a reference food group as it was commonly consumed by individuals in the sample and was more “neutral” than other food groups such as meats. Therefore, willingness to increase or reduce portions of a food group was presented relative to the willingness to increase or reduce portions of bread. For the sake of concision, we have omitted “relative to bread” throughout the remainder of this article.

Data are means $\pm$ SEM. An overall α level of 5% was used for statistical tests. Sample weightings were applied to ensure the representativeness of the sample with respect to sex, age, socio-professional category and geographic area of living, using the *Icarus* R package. All means were thus weighted in this way. When not stated otherwise, all analyses were performed using SAS 9.1.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

Results

Distribution of scores of willingness to modify portion sizes

The mean score was 3.76 ± 0.01 , and the median score was 4 for all foods and types of modifications combined. For each type of question, the distribution of the answers was not homogeneous ($P < 0.0001$). The most frequent score was 4 (18%) and the least frequent scores were 1 (13%), 2 (12%), 6 (13%) and 7 (12%) for questions related to reducing portion sizes. The most frequent scores were 1 (21%) and 2 (17%) for questions related to increasing portion sizes, and the most frequent grades were 1 (25%) and 7 (18%) for questions related to introducing a food not already consumed (**Figure 2**). Participants were more likely to be willing to eat smaller portions than to introduce new foods ($\beta = 0.32$, $P < 0.0001$), and to introduce new foods than to eat larger portions ($\beta = 0.16$, $P < 0.05$).

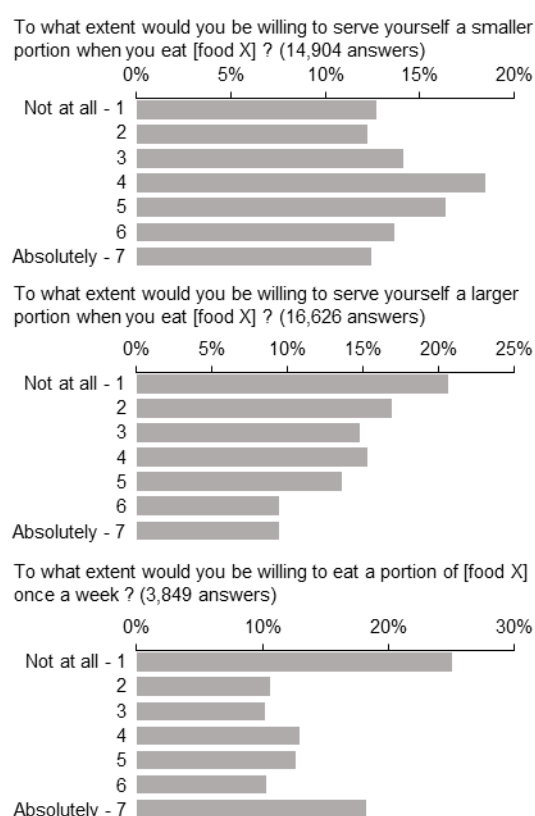


Figure 2. Distribution of scores for each type of modification, all foods combined, in the questionnaire sample (2018, $n=2,055$).

Food groups

The distributions were similar for most of the food groups for questions related to decreasing portions, 4 and 5 being the most frequent scores for 8 of the 10 food groups tested. When stratified by type of modification, there were some differences between the food groups, people being more willing to reduce portion sizes of pasta and pâté and less willing to reduce portion sizes of beef, cheese, ham and poultry, compared to bread (**Table 1**).

Table 1. Associations between willingness to change and the dietary and socio-demographic characteristics of the individuals assessed using binomial logistic regression ¹.

Variables	Reference	Smaller portion size OR [95%CI]	P	Larger portion size OR [95%CI]	P	Introduction of a small portion of a new food OR [95%CI]	P
Dietary pattern of protein intake cluster			<0.0001		<0.0001		NS
Pork eaters	Bread and dairy eaters	1.02 [0.92;1.13]		1.13 [1.02;1.25]		1.09 [0.89;1.34]	
Take-away eaters		1.11 [0.98;1.25]		1.34 [1.20;1.51]		1.12 [0.89;1.40]	
Healthy eaters		1.42 [1.23;1.63]		1.06 [0.94;1.21]		0.86 [0.64;1.15]	
Poultry eaters		1.26 [1.12;1.41]		1.11 [1.00;1.23]		0.87 [0.70;1.07]	
Beef eaters		1.11 [1.00;1.23]		0.91 [0.82;1.00]		1.03 [0.84;1.27]	
Quartile of frequency of intake of the food group considered			<0.0001		<0.0001		N/A
1 st	4 th	1.31 [1.17;1.47]		0.71 [0.64;0.78]		N/A	
2 nd		1.16 [1.05;1.28]		0.82 [0.74;0.90]		N/A	
3 rd		1.00 [0.89;1.12]		0.90 [0.81;0.99]		N/A	
Quartile of portion size of the food group considered			0.0034		<0.0001		N/A
1 st	4 th	0.98 [0.89;1.07]		0.59 [0.53;0.65]		N/A	
2 nd		0.86 [0.78;0.94]		0.86 [0.78;0.95]		N/A	
3 rd		0.95 [0.84;1.06]		1.09 [0.98;1.22]		N/A	
Consumers of the food group considered in the individual's cluster (%)²			N/A		N/A		<.0001
		N/A		N/A		1.025 [1.01;1.04]	
Appetite score (1-7)²			0.0019		<.0001		NS
		0.96 [0.94;0.99]		1.05 [1.03;1.08]		1.04 [0.99;1.09]	
Food group			<.0001		<.0001		<.0001
Beef	Bread	0.81 [0.69;0.94]		0.72 [0.63;0.82]		0.65 [0.38;1.09]	
Spinach/Chard		N/A		1.39 [1.17;1.66]		2.11 [1.11;4.04]	
Cheese		0.76 [0.65;0.90]		N/A		N/A	
Ham		0.85 [0.72;1.00]		N/A		N/A	
Legumes		N/A		0.80 [0.69;0.93]		1.56 [1.00;2.45]	
Nuts/Seeds		N/A		1.25 [1.08;1.46]		1.74 [1.03;2.93]	
Pâté		1.48 [1.24;1.77]		N/A		N/A	
Pastas		1.32 [1.13;1.55]		0.51 [0.44;0.58]		N/A	
Pasta/Potato dishes		1.03 [0.86;1.24]		N/A		N/A	
Fish		N/A		1.13 [0.98;1.30]		1.94 [1.20;3.13]	
Pork		1.07 [0.91;1.26]		N/A		N/A	
Rice/Wheat		N/A		0.61 [0.53;0.7]		1.35 [0.87;2.11]	
Sausage		1.01 [0.85;1.19]		N/A		N/A	
Poultry		0.69 [0.59;0.80]		0.82 [0.72;0.94]		0.68 [0.42;1.10]	
Yogurts		N/A		1.04 [0.90;1.19]		0.36 [0.22;0.58]	
Sex			<.0001		<.0001		NS
Male	Women	0.79 [0.74;0.85]		1.15 [1.08;1.24]		0.94 [0.82;1.09]	
Age (y)			NS		<0.0001		0.005
18-24	55-65	0.98 [0.85;1.14]		1.44 [1.25;1.65]		0.64 [0.48;0.85]	
25-34		0.98 [0.86;1.11]		1.49 [1.32;1.68]		0.74 [0.57;0.96]	
35-44		1.08 [0.96;1.22]		1.46 [1.30;1.64]		0.86 [0.67;1.10]	
45-54		0.94 [0.84;1.05]		1.35 [1.21;1.51]		0.98 [0.77;1.24]	
BMI (kg/m²)			<0.0001		0.0002		NS
≤18.5	18.5-25	0.85 [0.72;1.00]		0.81 [0.69;0.95]		0.78 [0.58;1.06]	
25-30		1.29 [1.19;1.40]		1.05 [0.97;1.13]		1.10 [0.94;1.29]	
> 30		1.18 [1.07;1.31]		0.85 [0.77;0.94]		0.89 [0.74;1.09]	
Region			0.0007		NS		NS
Paris region	South-East	0.75 [0.59;0.96]		0.97 [0.77;1.22]		0.81 [0.50;1.30]	
North-West		0.93 [0.85;1.03]		0.93 [0.84;1.02]		0.86 [0.71;1.04]	
North-East		1.06 [0.96;1.17]		0.94 [0.85;1.03]		1.03 [0.85;1.25]	

South-West		0.86 [0.76;0.97]	1.01 [0.90;1.13]	0.99 [0.78;1.27]	
Size of agglomeration (inhabitants)			0.0003	NS	0.04
< 2,000	Paris agglomeration	0.69 [0.53;0.90]	0.93 [0.73;1.19]	0.97 [0.58;1.61]	
2,000-20,000		0.64 [0.50;0.82]	0.95 [0.75;1.20]	0.96 [0.59;1.57]	
20,000-100,000		0.72 [0.56;0.94]	0.95 [0.75;1.22]	0.92 [0.55;1.54]	
>100,000		0.60 [0.46;0.78]	0.84 [0.65;1.08]	0.70 [0.42;1.18]	
Income (€/month)			0.0002	<0.0001	NS
≤1500	>3400	0.88 [0.79;0.99]	1.25 [1.12;1.39]	0.99 [0.80;1.23]	
1500-2500		0.85 [0.77;0.93]	1.00 [0.92;1.10]	0.98 [0.80;1.18]	
2500-3400		1.01 [0.92;1.12]	1.01 [0.92;1.10]	1.19 [0.97;1.46]	
Socio-professional characteristics			0.0002	NS	NS
Manual worker	Without professional activity (incl. students)	0.86 [0.72;1.03]	0.95 [0.80;1.13]	0.92 [0.64;1.31]	
Managerial staff		0.78 [0.66;0.91]	0.93 [0.80;1.08]	0.71 [0.52;0.97]	
Employee		0.91 [0.81;1.01]	1.06 [0.95;1.18]	0.81 [0.66;0.99]	
Intermediate profession		0.89 [0.78;1.02]	1.07 [0.94;1.21]	0.89 [0.69;1.16]	
Retired		0.70 [0.59;0.82]	1.09 [0.93;1.27]	0.73 [0.53;1.00]	
Level of education			0.009	0.016	0.037
Secondary	> 2 years after graduation	0.97 [0.87;1.08]	0.96 [0.87;1.06]	0.79 [0.65;0.97]	
First degree graduate		1.12 [1.01;1.23]	1.11 [1.01;1.21]	1.06 [0.87;1.29]	
Post-graduate (≤ 2 years after graduation)		0.94 [0.85;1.03]	1.09 [0.99;1.19]	0.87 [0.72;1.05]	

¹The binomial logistic regressions tested if scores were ≤ median (0) or not (1) for the three types of questions. The three models include the food group (but not the same depending on the type), cluster, appetite score, sex, age, socio-professional characteristics, income, BMI, level of education and size of agglomeration. The models for questions regarding larger or smaller portions included the quartile of frequency of intake, the quartile of portion size of the food, and the model for questions on introducing a new food were adjusted for the percentage of consumers of the food in the cluster. NS, Not significant ($P \geq 0.05$); N/A, Not included in the model

²The appetite score and the percentage of consumers in the cluster were quantitative variables so the odds ratios represent the variation of likelihood of being willing to modify a portion size per unit (1 additional percent of consumers in the cluster, or 1 score higher on the appetite score).

For questions related to increasing portions and introducing new foods, the distributions were different depending on the food considered. Indeed, individuals were less likely to be willing to eat larger portions of beef, legumes, pastas, rice/wheat and poultry than larger portions of bread, and more likely to eat larger portions of spinach/chard and nuts/seeds than bread. Likewise, non-consumers of spinach/chard, legumes, nuts/seeds and fish were more likely to eat a small portion of these foods than non-consumers of bread to eat a small portion of bread weekly, while non-consumers of yogurts were less willing to introduce yogurts into their diet.

Individual patterns of protein intake

Independently of the food groups, the scores related to increasing or decreasing portion sizes of protein food groups depended on individual food intakes. Indeed, individuals in the 4th quartiles of frequency of intake (for each food group) were 31% less likely to be willing to reduce portion sizes ($P<0.0001$) and 42% more likely to be willing to increase portion sizes ($P<0.0001$) than individuals in the 1st quartiles of frequency of intake. Individuals in the 4th quartile of portion sizes were 17% more likely to be willing to reduce portion sizes ($P<0.05$)

and 16% more likely to be willing to increase portion sizes ($P<0.0001$) than individuals in the 2nd quartile of portion sizes. Individuals in the 4th quartile of portion sizes were also 70% more likely to be willing to increase portion sizes than individuals in the 1st quartile of portion sizes ($P<0.0001$) (**Table 1**). Non-consumers were more likely to eat a new food weekly if the percentage of consumers in their clusters was high ($OR=1.025$, $P<0.0001$). This meant that for 10% more consumers of a food group in a cluster, non-consumers of this food in this cluster were 25% more likely to be willing to introduce this food group.

There were differences in willingness to change between the clusters. “Healthy eaters” (+42%, $P<0.0001$) and poultry eaters (+26%, $P<0.05$) were more willing to reduce portions than bread and dairy eaters. Pork eaters (+13%, $P<0.05$), take-away eaters (+34%, $P<0.0001$) and poultry eaters (+11%, $P<0.0001$) were more likely to be willing to eat larger portions than bread and dairy eaters. There was no significant difference between clusters regarding a willingness to introduce new foods. Interactions between cluster and food group variables were not significant in any of the models.

Sociodemographic characteristics

The appetite score was associated with a willingness to eat larger or smaller portions. For one additional point of appetite score, participants were 4% less willing to eat smaller portions and 5% more willing to eat larger portions. Men were less willing to eat smaller portion sizes and more willing to eat larger portion sizes than women. All the age groups were more likely to be willing to eat larger portions of foods than the 55-65y group, and the 18-34y group were less likely to introduce new foods than the 55-65y group. Underweight people were less willing to eat larger or smaller portions than people with a BMI between 18.5 and 25. Overweight individuals were more willing to eat smaller portions than people with a BMI between 18.5 and 25. Obese individuals were more willing to eat smaller portions and less willing to eat larger portions than people with a BMI between 18.5 and 25.

Participants from south-eastern France were more willing to eat smaller portions than

participants from the Paris region or south-western France, and participants living in and around Paris were more willing to eat smaller portions than those from smaller cities. People with a household income $<€2500/\text{month}$ were less willing to eat smaller portions than those with $>€3400/\text{month}$. Participants living with less than $€1500/\text{month}$ were more willing to eat larger portions than those living with more than $€3400/\text{month}$. Participants without a professional activity (including students) were more willing to eat smaller portions than most of the others. Participants who had completed a first degree were more willing to eat smaller portions than those with the highest level of education, and those in postgraduate education (≤ 2 years) were more willing to eat both larger and smaller portions than those who had completed postgraduate education (> 2 years). The latter were more willing to introduce new foods than people with secondary education only.

Discussion

In a large sample representative of the French population, we were able to determine that people could be more or less willing to modify their eating behaviors depending on the type of change suggested (increase/reduction in portions or the introduction of new foods), the foods considered and the personal characteristics of respondents.

The dietary patterns of protein food intake identified in our study were similar to those seen in a previous analysis of dietary intakes in the French population in 2006-2007 using a similar method (31). In more detail, beef, pork, poultry and bread and dairy eaters were identified in both studies, whereas take-away eaters in the present study included both take-away and processed meat eaters in the previous study (31). “Healthy eaters” in the present study differed somewhat from fish eaters in that study: “healthy eaters” and fish eaters both ate more fish and whole grain cereals but “healthy eaters” (unlike fish eaters in the previous study) also ate more legumes, vegetables, nuts and seeds and fewer dairy products than the overall population. These contrasts could be explained either by the different methods used to assess food intake (FFQ vs 7-day food record), or by changes to dietary patterns of protein food consumption between 2006-2007 and 2018.

People were generally more willing to reduce portion sizes than to introduce new foods, and even more so than increasing portion sizes, even though the effects of different recommendations varied across food groups. A willingness to reduce portions was relatively high and fairly consistent across the groups. However, consumers who ate a food frequently were less willing to eat smaller portions and more willing to eat larger portions than those who ate the food the least frequently. This result could indeed reveal that a high frequency of intake contributes markedly to the structuring of food intake and therefore to consumer representations of their diet, thus reflecting a certain behavioral inertia. In other words, the frequency of intake of a food seemed to be associated with liking this food. These results are in line with studies showing that the liking of foods was the strongest determinant of the usual

portion sizes observed (35). Likewise, consumers eating the largest portions were more willing to eat even larger portions than those eating the smallest portions. This might appear intuitive if you consider that increasing the portion size of a large portion has less effect on the overall portion size than increasing the portion size of a small portion.

Furthermore, there were differences in willingness to eat smaller portions across food groups, mostly concerning meat (beef, ham and poultry) and cheese where people were less likely to reduce their portions than other foods. This could be related to the attachment to meat of some groups in the population (36) as an identity reference point of their diet. By contrast, scores on increasing portions or introducing new foods were closely dependent on the food considered. For larger portions, this could be because some food groups were considered to be healthier or less satiating than others. Indeed, dietary guidelines recommend a higher intake of vegetables, fish, nuts and seeds (which volunteers were more willing to increase than bread) and to limit red meat (4), which they were less willing to increase than bread. Participants were nevertheless less willing to eat larger portion sizes of legumes than of bread, although recent guidelines have supported a high intake of this food group (4, 5). However, this recommendation is very recent in France and concerns a food group that remains associated in the minds of consumers mind with flatulence and weight gain (37, 38).

The introduction of new foods differed from the other changes, as willingness was often either low (1 or 2) or high (6 or 7) depending on the individual. This ambivalent result could reveal an overlap between behaviors. On the one hand, a strong refusal to consume certain foods might be due to a weak preference or a conscious decision to exclude that food type because of a specific diet (e.g. 18% of non-beef-consumers and 23% of non-poultry consumers were vegetarians, with virtually all of them “not willing at all” to eat a small portion of beef or poultry each week). These individuals might associate the foods they did not want to introduce with disgust and moral internalization, as is the case for meat and vegetarians (39). More surprisingly, however, this was also the case for yogurts; non-consumers were not willing to eat them. This may have resulted from recent negative information on dairy products (40). On

the other hand, some consumers declared a strong willingness to consume some foods, even if they did not currently eat them. This was particularly true for foods considered to be healthy (e.g. legumes, vegetables, nuts, seeds and fish), and among participants who, despite declaring themselves as non-consumers belonged to a cluster of high consumers. Indeed, a self-declared non-consumer within a cluster of people with a similar dietary pattern including a high percentage of consumers probably had close social proximity with this food that made it less likely for them to intentionally exclude it. In the ecological framework depicting the multiple influence that affect what people eat (41), this type of influence would belong to a “social environment network”, which is the most important influence ahead of individual personal factors and acts governed by mechanisms such as role modeling, social support, and social norms.

Although the cluster of dietary patterns had no effect on willingness to introduce new foods (beyond the percentage of consumers within the cluster), it was generally important regarding willingness to eat smaller or larger portions. Bread and dairy eaters were less willing to change their portion sizes than participants in other clusters, and take-away eaters were more willing to eat larger portions than individuals in other clusters. Furthermore, men were more willing to eat larger portions and less willing to eat smaller portions than women, which could be related to the fact that women are more likely to try to lose weight and be unhappier about their body image than men, or that most of the questions regarding smaller portions were linked to meat, and women are less likely to see meat as healthy (42). Participants in the lowest income group were more willing to eat larger portions and less willing to eat smaller portions than those in the highest income group, which could be related to a fear of food penury and insecurity among these lower income participants (43). Participants who were overweight were likely to comply with recommendations to eat smaller portions, whereas obese people were willing to eat smaller portions but less willing to eat larger portions, which may relate to a willingness to control weight or align their declaration with that social norm. Participants in the oldest age group was less willing to consume larger portions, irrespective of the other factors studied and

associated with age, such as adherence to a bread and dairy dietary pattern and BMI. This age-specific finding was in line with longitudinal studies which had shown that aging is associated with a reduction in appetite and willingness to eat (44). By contrast, participants in the oldest age group was more willing to introduce foods they did not already consume than their younger counterparts, which is inconsistent with data in the literature which showed that the elderly are usually more neophobic than other age groups (45, 46). This could be explained by the fact that the elderly actually knew about the foods being recommended but were not used to eating them, unlike younger participants who might not be aware of these foods.

Some limitations and uncertainties of this study need to be underlined. The estimates of food intake and contribution to protein intake were partial, because the subjects were only asked to declare their intake of protein food groups. The protein dietary patterns identified were thus based on partial information. Indeed, some food groups, such as meat substitutes based on plant protein were not reported. Furthermore, the questions concerning a willingness to modify dietary behavior were declarative, and might have suffered from desirability bias, inasmuch as we mentioned to the volunteers that the modifications were likely to lead towards a more balanced diet. However, the objective of this study was to estimate differences in willingness according to the type of change rather than establishing an absolute willingness to adopt dietary changes. BMI values also came from declared data only, so they may have been biased (39). Summarizing the rating scale scores as a binary variable (“willing” or “not willing”) resulted in some loss of information and this may have produced some simplified results that should be interpreted with caution. However, because the scores were not normally distributed, this analysis was the most appropriate to tackle the complexity of the data at hand. The portion sizes shown to participants (i.e. photos of foods presented on plates) did not have the same differences in terms of quantity. For example, there were 20g of difference between two portion size of nuts and seeds, and 50g for poultry meat. This could have influenced the willingness to eat a larger portion size, as individuals could have found it easier to eat 20g rather than 50g more. However, this portion size “step” effect was tested in the three models and was not found

to be significant. Any liking for foods not consumed by the participants was not recorded, which could have explained the ambivalence in willingness to introduce new foods (either a strong refusal or a strong approval). Finally, the questions on willingness to change food behavior did not concern replacements for protein food portions, as had been the case of the simulations in the study mentioned above (24). This could have an influence as two questions about eating a larger portion of one food and a smaller portion of another food was not the same as a single question about eating a smaller portion of a food and replacing it with a larger portion of another food. However, our goal was to test a relatively large number of different foods, which would not have been possible in a short questionnaire if substitutions were included.

Conclusion

We can therefore conclude that people are in general not very willing to increase portion sizes, more willing to introduce new foods, and even more willing to reduce portion sizes. There are major differences regarding willingness to change intake across different food groups that might depend on the general perception of a food group, e.g. its healthiness, the individual's frequency of intake, or portion size in the food group, and the sociodemographic characteristics of the individual (e.g. BMI, age). One important finding was that people were willing to eat larger portions of foods that were generally considered as healthy and that they were already consuming in large quantities and at high frequencies; conversely, they were willing to eat smaller portions of foods that they did not consume frequently. The dietary pattern of protein intake was key to predicting the willingness of non-consumers to eat new foods, since we were able to show that the more a food was consumed by people belonging to a cluster, the more another person who was a non-consumer but belonged to this cluster was willing to introduce that food into his or her diet. Finally, we showed that overall resistance to favorable changes to dietary protein intake, particularly in terms of eating larger portions, was weaker with respect to changes corresponding to dietary guidelines but generally remained dependent on the protein profile of the individuals. Our findings identified certain barriers and levers that need to be considered when developing strategies designed to promote a healthier diet by means of

acceptable changes to food practices.

List of abbreviations

BMI, Body Mass Index; CI, Confidence Interval; FFQ, Food Frequency Questionnaire; INCA, French individual and national study on food consumption; NMF, Non-negative matrix factorization; OR, Odd Ratio; SD, Standard Deviation; SEM, Standard Error of the Mean

Declarations

Ethics approval and consent to participate

As no personal data was collected on participants, an official approval of the study was not required by the CNIL. Each participant gave informed consent on the first page of the web-survey. The provision of consent enabled access to the full survey.

Consent for publication

Not applicable.

Availability of data and materials

The datasets used and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Competing interests

The authors declare that they have no competing interests.

Funding

This research received no specific grant from any funding agency, commercial or not-for-profit sectors.

Author's contributions

E.G., J-F.H. and F.M. formulated the research questions, E.G., O.D., J-F.H. and F.M. designed the study, E.G. carried out the study, E.G. analyzed the data, E.G., O.D., H.F., J.D., N.D., J-F.H. and F.M. interpreted the data and wrote the article. All authors read and approved the final manuscript.

Acknowledgements

The authors would like to thank Dr. Serge Hercberg (EREN, Bobigny, France) for access to the images of food portions.

References

1. FAO. FAOSTAT - <http://www.fao.org/faostat/en/#data/CL>. 2018.
2. FranceAgriMer. Impact de la crise économique sur la consommation de viande et évolution des comportements alimentaires. Les synthèses de FranceAgriMer. 2015;21.
3. Godfray HCJ, Aveyard P, Garnett T, Hall JW, Key TJ, Lorimer J, et al. Meat consumption, health, and the environment. *Science*. 2018;361(6399).
4. Anses. Updating of the PNNS guidelines: revision of the food-based dietary guidelines - <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-1EN.pdf>. Anses opinion - Collective expert report. 2016.
5. U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture. 2015–2020 Dietary guidelines for Americans - Available at <http://health.gov/dietaryguidelines/2015/guidelines/> (accessed on 01/03/2018). Washington (DC): 2015.
6. Escalon H, Bossard C, Beck F, Bachelot-Narquin R. Baromètre santé nutrition 2008 - <http://inpes.santepubliquefrance.fr/Barometres/barometre-sante-nutrition-2008/pdf/typologie-des-mangeurs.pdf>. Saint-Denis: 2009.
7. Tavoularis G, Hébel P. Fruits et légumes : les Français suivent de moins en moins la recommandation - <https://www.credoc.fr/download/pdf/4p/292.pdf>. Consommation et modes de vie. 2017;292.
8. Clonan A, Wilson P, Swift JA, Leibovici DG, Holdsworth M. Red and processed meat consumption and purchasing behaviours and attitudes: impacts for human health, animal welfare and environmental sustainability. *Public Health Nutr*. 2015;18(13):2446-56. Epub 2015/03/13.
9. De Backer CJS, Hudders L. Meat morals: relationship between meat consumption consumer attitudes towards human and animal welfare and moral behavior. *Meat Science*. 2015;99(Supplement C):68-74.
10. Amiot CE, El Hajj Boutros G, Sukhanova K, Karelis AD. Testing a novel multicomponent intervention to reduce meat consumption in young men. *PLoS One*. 2018;13(10):e0204590.

11. de Boer J, Aiking H. Pursuing a Low Meat Diet to Improve Both Health and Sustainability: How Can We Use the Frames that Shape Our Meals? *Ecol Econ*. 2017;142:238-48.
12. Bianchi F, Garnett E, Dorsel C, Aveyard P, Jebb SA. Restructuring physical micro-environments to reduce the demand for meat: a systematic review and qualitative comparative analysis. *The Lancet Planetary Health*. 2018;2(9):e384-e97.
13. Vandenbroele J, Slabbinck H, Van Kerckhove A, Vermeir I. Curbing portion size effects by adding smaller portions at the point of purchase. *Food Qual Prefer*. 2018;64(Supplement C):82-7.
14. Poquet D, Chambaron-Ginhac S, Issanchou S, Monnery-Patris S. Interroger les représentations sociales afin d'identifier des leviers en faveur d'un rééquilibrage entre protéines animales et végétales : approche psychosociale. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. 2017;52(4):193-201.
15. Vanhonacker F, Van Loo EJ, Gellynck X, Verbeke W. Flemish consumer attitudes towards more sustainable food choices. *Appetite*. 2013;62(Supplement C):7-16.
16. de Boer J, Schösler H, Aiking H. "Meatless days" or "less but better"? Exploring strategies to adapt Western meat consumption to health and sustainability challenges. *Appetite*. 2014;76:120-8.
17. Schösler H, de Boer J, Boersema JJ. Can we cut out the meat of the dish? Constructing consumer-oriented pathways towards meat substitution. *Appetite*. 2012;58(1):39-47.
18. Gazan R, Brouzes CMC, Vieux F, Maillot M, Lluch A, Darmon N. Mathematical Optimization to Explore Tomorrow's Sustainable Diets: A Narrative Review. *Adv Nutr*. 2018;9(5):602-16.
19. Horgan GW, Perrin A, Whybrow S, Macdiarmid JI. Achieving dietary recommendations and reducing greenhouse gas emissions: modelling diets to minimise the change from current intakes. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity*. 2016;13(1):46.
20. Maillot M, Vieux F, Amiot MJ, Darmon N. Individual diet modeling translates nutrient recommendations into realistic and individual-specific food choices. *Am J Clin Nutr*. 2009;91(2):421-30.

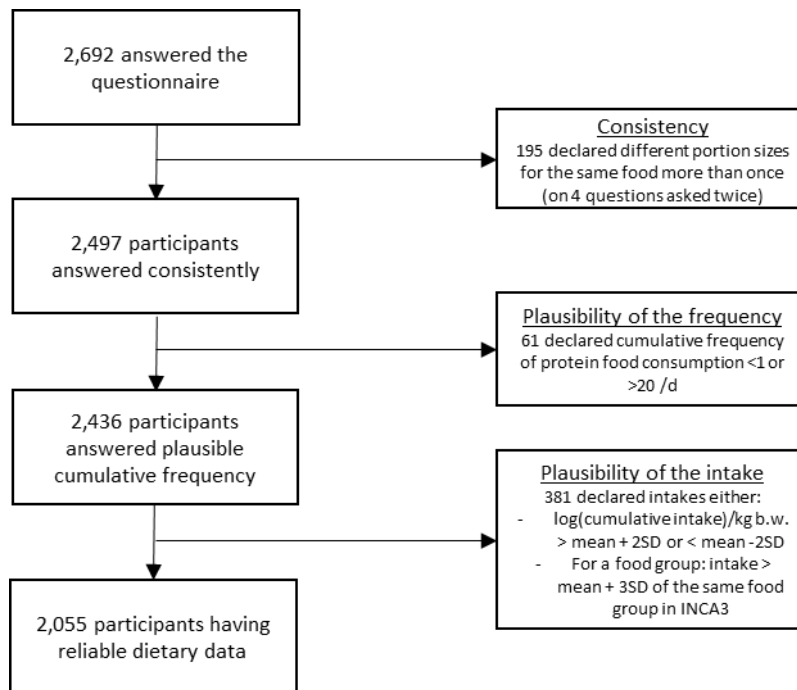
21. van Dooren C, Tyszler M, Kramer GFH, Aiking H. Combining Low Price, Low Climate Impact and High Nutritional Value in One Shopping Basket through Diet Optimization by Linear programming. *Sustainability*. 2015;7(9):12837.
22. Pfeiler TM, Egloff B. Personality and meat consumption: The importance of differentiating between type of meat. *Appetite*. 2018.
23. Latvala T, Niva M, Mäkelä J, Pouta E, Heikkilä J, Kotro J, et al. Diversifying meat consumption patterns: Consumers' self-reported past behaviour and intentions for change. *Meat Science*. 2012;92(1):71-7.
24. de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F. The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. *J Nutr*. 2019;149(3):488-96.
25. Sindhwani V, Bucak S, Hu J, Mojsilovic A, editors. A family of non-negative matrix factorizations for one-class collaborative filtering problems. *Proceedings of the ACM Recommender Systems Conference, RecSys*; 2009.
26. Blundell J, de Graaf C, Hulshof T, Jebb S, Livingstone B, Lluch A, et al. Appetite control: methodological aspects of the evaluation of foods. *Obesity reviews : an official journal of the International Association for the Study of Obesity*. 2010;11(3):251-70. Epub 2010/01/29.
27. Le Moullec N, Deheeger M, Preziosi P, Monteiro P, Valeix P, Rolland-Cachera M-F, et al. Validation du manuel-photos utilisé pour l'enquête alimentaire de l'étude SU. VI. MAX. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. 1996;31(3):158-64.
28. Dubuisson C, Lioret S, Touvier M, Dufour A, Calamassi-Tran G, Volatier J-L, et al. Trends in food and nutritional intakes of French adults from 1999 to 2007: results from the INCA surveys. *Br J Nutr*. 2010;103(07):1035-48.
29. Anses. Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>. Rapport d'expertise collective. 2017.

30. Anses. Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles - www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf. Rapport d'expertise collective. 2016.
31. de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F. Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population. *Nutrients*. 2018;10(2):226.
32. Brunet J-P, Tamayo P, Golub TR, Mesirov JP. Metagenes and molecular pattern discovery using matrix factorization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2004;101(12):4164-9.
33. Gazan R, Béchaux C, Crépet A, Sirot V, Drouillet-Pinard P, Dubuisson C, et al. Dietary patterns in the French adult population: a study from the second French national cross-sectional dietary survey (INCA2) (2006–2007). *Br J Nutr*. 2016;116(2):300-15.
34. Sy MM, Feinberg M, Verger P, Barré T, Cléménçon S, Crépet A. New approach for the assessment of cluster diets. *Food Chem Toxicol*. 2013;52:180-7.
35. Spence M, Stancu V, Dean M, Livingstone MBE, Gibney ER, Lähteenmäki L. Are food-related perceptions associated with meal portion size decisions? A cross-sectional study. *Appetite*. 2016;103:377-85.
36. Graça J, Calheiros MM, Oliveira A. Attached to meat? (Un)Willingness and intentions to adopt a more plant-based diet. *Appetite*. 2015;95(Supplement C):113-25.
37. Schneider AVC. Overview of the market and consumption of pulses in Europe. *Br J Nutr*. 2002;88(S3):243-50. Epub 2007/03/09.
38. Winham DM, Hutchins AM. Perceptions of flatulence from bean consumption among adults in 3 feeding studies. *Nutr J*. 2011;10(1):128.
39. Petti A, Palmieri B, Vadalà M, Laurino C. Vegetarianism and veganism: not only benefits but also gaps. A review. *Progress in Nutrition*. 2017;19(3):229-42.
40. Mishali M, Avrech T, Igra L. Conceptualization and Measurement of Consumers' Objection to Dairy Products Consumption in Israel: A New Approach for Understanding and Relating to Anti-Dairy Products Propaganda. *Journal of International Food & Agribusiness Marketing*. 2016;28(3):225-39.

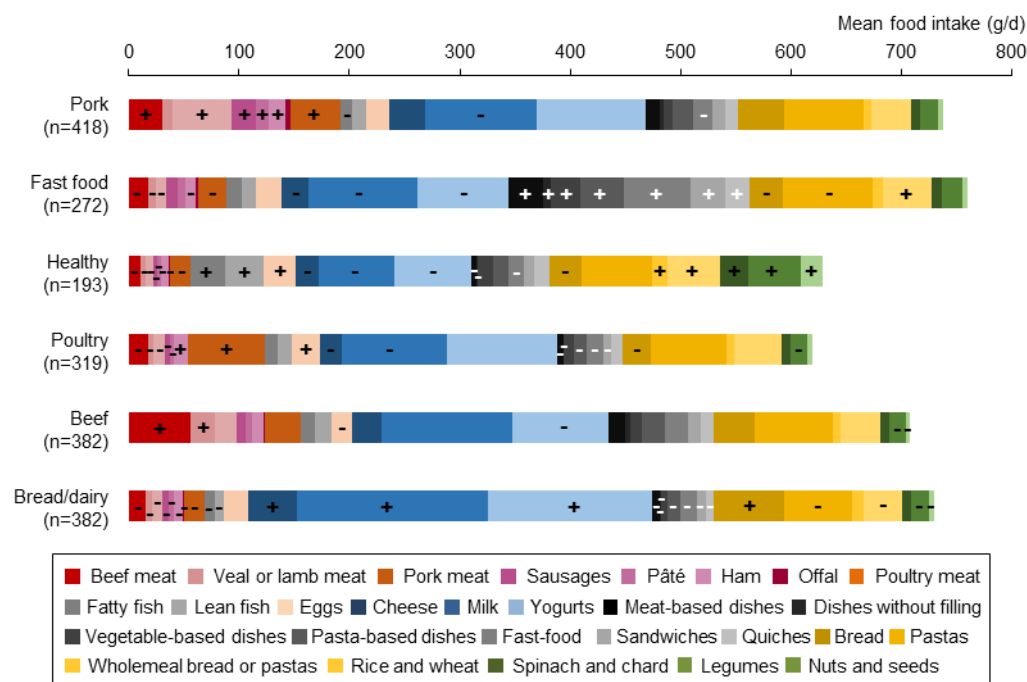
41. Story M, Kaphingst KM, Robinson-O'Brien R, Glanz K. Creating Healthy Food and Eating Environments: Policy and Environmental Approaches. *Annu Rev Public Health*. 2008;29(1):253-72.
42. Beardsworth A, Bryman A, Keil T, Goode J, Haslam C, Lancashire E. Women, men and food: the significance of gender for nutritional attitudes and choices. *British Food Journal*. 2002;104(7):470-91.
43. Chang Y, Chatterjee S, Kim J. Household Finance and Food Insecurity. *Journal of Family and Economic Issues*. 2014;35(4):499-515.
44. Fávaro-Moreira NC, Krausch-Hofmann S, Duyck J, Matthys C, Vanhauwaert E, Declercq A, et al. Risk Factors for Malnutrition in Older Adults: A Systematic Review of the Literature Based on Longitudinal Data. *Adv Nutr*. 2016;7(3):507-22.
45. Meiselman HL, King SC, Gillette M. The demographics of neophobia in a large commercial US sample. *Food Qual Prefer*. 2010;21(7):893-7.
46. Siegrist M, Hartmann C, Keller C. Antecedents of food neophobia and its association with eating behavior and food choices. *Food Qual Prefer*. 2013;30(2):293-8.

Additional Material

- Additional Figure 1, [additional_figure_1.pdf](#), Flow chart of the selection of reliable dietary data in the population sample (2018, n=2,055)
- Additional Figure 2, [additional_figure_2.pdf](#), Mean food intake of the clusters of protein food intake identified in the population sample (2018, n=2,055). +/-: mean intake significantly higher or lower than the overall population, as tested using post-hoc pairwise comparisons with Tukey corrections.
- Additional Table 1, [additional_table_1.pdf](#), STROBE-nut: An extension of the STROBE statement for nutritional epidemiology



Additional Figure 1. Flow chart of the selection of reliable dietary data in the population sample (2018, n=2,055)



Additional Figure 2. Mean food intake of the clusters of protein food intake identified in the population sample (2018, n=2,055). +/-: mean intake significantly higher or lower than the overall population, as tested using post-hoc pairwise comparisons with Tukey corrections.

2.6. Travail personnel n°6 : La modélisation de modifications graduelles de la consommation de sources de protéines pour améliorer l'adéquation nutritionnelle mène à une meilleure durabilité lorsqu'on cible systématiquement les protéines végétales.

Résumé

Contexte : En lien avec les enjeux globaux de durabilité, nous assistons actuellement à une transition vers une diminution de la consommation de protéines animales. On ne sait toujours pas dans quelle mesure les réarrangements progressifs des profils de consommation protéique ont une incidence sur la durabilité de l'alimentation et le changement climatique.

Objectif : Notre objectif était d'évaluer les impacts sur les paramètres de durabilité des réarrangements de l'apport en protéines destinés à améliorer l'adéquation nutritionnelle, contraints ou non par une augmentation des protéines végétales.

Méthode : Nous avons utilisé les données d'une enquête représentative française et sélectionné pour chaque individu la substitution d'une portion d'un aliment protéique par une portion d'un autre aliment protéique qui améliorerait le plus l'adéquation nutritionnelle (en utilisant le score probabiliste PANDiet). Ceci a été répété 20 fois en contraignant à une augmentation du pourcentage de protéines végétales (SP) ou non (SN) à chaque itération. Les paramètres de durabilité étudiés étaient le coût de l'alimentation, les émissions de gaz à effet de serre (GES), le risque lié à l'exposition aux contaminants alimentaires et les morts prématurées évitées.

Résultats : L'apport en protéines végétales (31,1 % des protéines totales) a diminué dans le SN (30,0 %) et augmenté dans le SP (37,7 %). Les groupes alimentaires dont la contribution à l'apport en protéines a le plus augmenté sont les légumineuses (+225 %), les poissons gras (+151 %) et le poulet maigre (+82 %) dans le SN et les légumineuses (+502 %), les pizzas et quiches (+190%) et les poissons gras (+102%) dans le SP. Le score PANDiet a légèrement plus augmenté dans le SN ($+7,5 \pm 0,1$) que dans le SP ($+6,2 \pm 0,1$). Les niveaux d'émissions de GES ont augmenté de $5,4 \pm 0,05$ à $5,7 \pm 0,04$ kg éq.CO₂/j dans le SN et ont diminué à $5,1 \pm 0,04$ dans le SP. Le coût de l'alimentation a augmenté de $7,4 \pm 0,06$ à $8,2 \pm 0,05$ €/j dans le SN et $7,6 \pm 0,05$ dans le SP. Les morts prématurées évitées estimées en France étaient de 2 200 [1700;2700] par an dans le SP et de 1 700 [1400;2000] dans le SN.

Conclusion : Pousser à une augmentation systématique de la part de protéines végétales limite légèrement le gain d'adéquation nutritionnelle mais aboutit à des régimes alimentaires plus durables.

Valorisation : Ce travail a été soumis à la revue *Climatic Change* le 2 février 2019.

Messages-clés

- En simulant des modifications diététiques graduelles visant à améliorer l'adéquation nutritionnelle uniquement, le pourcentage de protéines végétales diminue.
- Les groupes alimentaires dont la contribution aux apports protéiques augmente le plus peu importe le scénario sont les légumineuses et le poisson gras.
- Contraindre à augmenter systématiquement la part de protéines végétales dans les régimes limite le gain d'adéquation nutritionnelle, mais aboutit à des régimes alimentaires plus durables (plus de morts prématurées évitées, un prix inférieur et des émissions de GES inférieures).

Modeling gradual changes in protein intake to increase nutrient adequacy leads to greater sustainability when systematically targeting plant protein

Erwan de Gavelle, Pascal Leroy, Marjorie Perrimon, Jean-François Huneau, Véronique Sirot, Caroline Orset, Hélène Fouillet, Louis-Georges Soler, François Mariotti

Author affiliations: UMR PNCA, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France (E.G., M.P., J-F.H., H.F., F.M.), UMR ALISS, INRA, 94200 Ivry-sur-Seine, France (P.L., L-G.S.), ANSES, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety, 94701 Maisons-Alfort, France (V.S.), Economie Publique, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005 Paris, France (C.O.)

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

Abstract

In line with sustainability issues, we are currently seeing a transition towards a lower consumption of animal protein. How ongoing gradual rearrangements in protein patterns impact sustainability and climatic change remains unknown. We used data from a French representative survey and selected for each individual the substitution of a portion of a protein food for a portion of another protein food that most improved nutritional adequacy (using the probabilistic PANDiet score). This was repeated 20 times with an increase in the percentage of plant protein required (SP) or not (SN) at each iteration. The sustainability endpoints were diet costs, greenhouse gas emissions (GHGE), risk of exposure to food contaminants and predicted premature deaths avoided. The plant protein intake (31.1% total protein) decreased under SN (30.0%) and increased under SP (37.7%). The food groups whose contribution to protein intake increased the most were legumes (+225%), fatty fish (+151%) and lean chicken (+82%) under SN and legumes (+502%), pizzas and quiches (+190%) and fatty fish (+102%) under SP. The PANDiet score rose slightly more under SN ($+7.5 \pm 0.1$) than SP ($+6.2 \pm 0.1$). GHGE levels increased from 5.4 ± 0.05 to 5.7 ± 0.04 kg eq.CO₂/d under SN and decreased to 5.1 ± 0.04 under SP. Diet costs increased from 7.4 ± 0.06 to 8.2 ± 0.05 €/d under SN and 7.6 ± 0.05 under SP. Predicted avoided premature deaths annually in France were 2,200 [1700;2700] under SP and 1,700 [1400;2000] under SN. Pushing for a systematic increase in plant share slightly limit the gain in nutritional adequacy but result in diets that are far more sustainable.

Keywords: Plant protein, diet modeling, nutrient adequacy, simple changes, sustainability parameters, French population.

1. Introduction

The FAO defined sustainable diets as “diets with low environmental impacts which contribute to food and nutrition security and to healthy life for present and future generations. Sustainable diets are protective and respectful of biodiversity and ecosystems, culturally acceptable, accessible, economically fair and affordable; nutritionally adequate, safe and healthy; while optimizing natural and human resources” (Burlingame and Dernini 2012) . The consumption of animal protein, and particularly of meat, has been associated with negative effects on several sustainability parameters when compared to plant sources of protein (Godfray et al. 2018). Indeed, a high consumption of red and processed meats has been associated with a risk of colorectal cancer and cardiovascular diseases (Anses 2016a; Norat et al. 2005; Rohrmann et al. 2013) which are central to the disease burden in western countries. Animal protein sources generate more greenhouse gas emissions (GHGE) than plant protein sources (Gerber et al. 2013), in a context where GHGE are a crucial feature of climate change issues (Cleveland and Gee 2017). With regards to the cost of diets, meat and fish are among the principal contributors while cereals and legumes contribute much less (Darmon and Drewnowski 2015). However, animal and plant protein sources have completely different nutrient profiles and so their substitutability needs to be studied in the context of the complex dietary models that govern their intake. Indeed, because animal products are the main sources of protein, iron, zinc and vitamin B-12 in western diets, a drastic reduction of their consumption could lead to an inadequacy of these nutrients of importance to nutrition security (Phillips et al. 2015). Animal and plant protein sources also differ in terms of the contaminants profiles, with fish containing higher concentrations of dioxin, furans and methylmercury and vegetables or cereal-based foods containing more lead, nickel, cadmium, mycotoxins and pesticide residues (Anses 2011b; Millour et al. 2011; Noël et al. 2012; Nougadère et al. 2012; Sirot et al. 2013; Sirot et al. 2012).

Since the early 2000s, the trend towards reducing meat consumption in western countries because of the concerns regarding sustainability issues mentioned above (FranceAgriMer 2015; Godfray et al. 2018) has caused a general rearrangement the consumption of protein sources. More plant-based diets such as semi-vegetarian and vegetarian are becoming increasingly popular and they are expected to favor long term-health and be more sustainable when compared to standard western diets (Appleby and Key 2016; Orlich et al. 2013). Dietary transitions operate mainly via a series of gradual changes to individual dietary choices rather than an abrupt adherence to predefined diets such as those proposed in national guidelines (Anses 2016e; U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture 2015) or consumed by a small part of the population (e.g. vegetarians) (Niva et al. 2017). It nevertheless remains unclear how the general population might

make gradual, simple and appropriate changes to their diet in order to improve its quality while reducing its content in animal foods. Recent studies have shown that the dietary patterns of individuals are key to identifying the best modifications that can be made to protein intake in order to increase overall nutrient adequacy (de Gavelle et al. 2019). As we showed in that recent study, the simple and gradual changes to protein patterns in a population would be the first steps in rearranging protein intake and can be studied by modeling unitary modifications to portion sizes with nutritional objectives such as improving nutrient adequacy. Studying the effect of constraints to achieve a higher plant:animal protein ratio could be useful to understand how this affects different sustainability endpoints.

The objective of the present study was therefore to identify pathways of simple modifications to the consumption of protein components in the diet that could lead to improved nutrient adequacy, with or without the systematic targeting of an increase in plant protein. We thus assessed the effects of these change scenarios on diet costs, GHGE, exposure to food contaminants and the number of premature deaths avoided.

2. Subjects and Methods

2.1. Population, food intake and dietary composition

The study sample was composed of participants of the second individual and national food consumption study (INCA2) conducted in 2006-2007, as previously described (de Gavelle et al. 2017; de Gavelle et al. 2019; Dubuisson et al. 2010). In summary, we excluded adults over 65 years of age (because their nutrient requirements differ from those of younger adults) and energy under- and over-reporters, resulting in a final sample of 1,678 adults representative of the French population (717 males and 961 females aged 18 to 65 years old) (Online Resource 1). Food intakes were calculated from seven-day food records, and individual characteristics from self-reported questionnaires and in-person interviews. The nutritional composition of the foods involved has already been described in detail (de Gavelle et al. 2018). In brief, data were extracted from the 2016 CIQUAL (Centre d'Information sur la Qualité des Aliments – Centre for Information on Food Quality) food composition database (Anses 2016b), an amino acid database as previously described (de Gavelle et al. 2017), and databases on phytate (Amirabdollahian and Ash 2010), and heme and non-heme iron in animal foods (Centre d'Information des Viandes 2005; Centre d'Information des Viandes & INRA 2009; Kongkachuichai et al. 2002). The digestibility of protein (de Gavelle et al. 2017) and the bioavailability of iron (Armah et al. 2013; Hallberg and Hulthen 2000) and zinc (Miller et al. 2007) were taken into account. The food groups presented in this publication were adapted from the INCA2 food groups, taking account of their fat content. Indeed, meat (excluding poultry) and poultry were both split into two groups depending on whether or not fat contributed to more than 35% of energy; 71% of meat foods were “fatty meat” and 61% of poultry foods were “fatty poultry”. Fish was considered as “fatty” if the EPA+DHA content was >1g/100g (Anses 2016e); 34% of fish-based foods were considered to be “fatty”.

Protein foods were defined as INCA2 food items that met two criteria: 1) the percentage of energy from protein was >10%, (referring to their intrinsic protein content), and 2) the level of intake at the 90th percentile was >5g protein/portion, referring to their potential contribution to protein intake at a relatively high level of consumption. The percentages of protein foods in each food group are detailed in Online Resource 2.

2.2. Nutrient adequacy

Nutrient adequacy was assessed using PANDiet probabilistic scoring (Verger et al. 2012), as previously described (de Gavelle et al. 2019). Briefly, the PANDiet score is calculated as the mean of an Adequacy Sub-score (AS), which is the average of the probabilities of adequacy (PAs) of nutrients for which an Estimated Average Requirement is defined, and a Moderation Sub-score (MS), which is the average of the PAs of nutrients with an existing upper bound reference value. The reference values applied were mainly the most recent values published

by the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety (Anses) (Anses 2016). For each individual, we therefore calculated the PANDiet score (from 0 to 100) where a higher score reflected the higher overall nutrient adequacy of the diet. Details on the PANDiet score are given in Online Resource 3.2.3.

Statistical analyses and models

Stepwise dietary models of changes were used to improve the initial PANDiet score calculated for each individual. The models consisted of pairing an increase in the portion size of a protein food with a reduction in the portion size of another protein food in the 7-day diets of the INCA2 individuals. Every possible paired modification was simulated, and the PANDiet score was calculated for each of them. The algorithm then selected the paired modification that most markedly increased the PANDiet score, and implemented the modification in the 7-day diet of the individual. This process was iterated 20 times. We limited the models to 20 steps in order to avoid any drastic change to the diets, as performed in other studies (Verger et al. 2014). Two different scenarios were implemented, as adapted from the scenarios previously described (de Gavelle et al. 2019).

Under the first scenario (SN, standing for scenario with no constraint), individuals could have paired modifications between two protein foods that they were already consuming. Moreover, they could reduce the portion size of a protein food consumed, while introducing a portion of food not consumed in the observed diet but consumed by >10% of individuals with a similar pattern of protein food intake. This scenario was designed as the S2 we previously described (de Gavelle et al. 2019). Under the second scenario (SP, for constrained by an increase in the plant:animal protein ratio), the same modifications were permitted but the percentage of plant protein in the diet of each individual had to increase at each iteration of the stepwise models, i.e. the modification was constrained by an increase in plant:animal protein. Details on the paired modifications of portion sizes are given in Online Resource 4 and 5.

The weighting schemes proposed in INCA2 were used to ensure statistical representativeness. An overall level of 5% was used for statistical tests. When ANOVA identified a significant effect of the type of scenario, we used pairwise post hoc tests with Bonferroni correction to examine differences between the observed and each of the two final simulated diets. All analyses were performed using SAS 9.1.3 (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA).

2.4. Sustainability parameters

The prices of food items were obtained from the 2006 Kantar WorldPanel household consumer panel for France (Kantar WorldPanel 2006), which gives the annual expenditures on and quantities purchased of each food item available on the market by a representative sample of 12,000 French households. A price was assigned to

each INCA2 food commodity and a mean price per individual and per day was calculated. A GHGE estimate, expressed in grams of CO₂ equivalents (g CO₂eq), was assigned to each of the food items in the INCA2 nomenclature using the 151 food categories for which an estimation of GHGE had been performed using Life Cycle Assessment (LCA) by Hartikainen et al. (Hartikainen and Pulkkinen 2016).

The dietary exposure of INCA2 individuals was assessed by combining individual consumption data and occurrence data from the French Second Total Diet study (TDS2). This study listed the concentrations of 440 substances (including trace elements, persistent organic pollutants, additives, pesticide residues, mycotoxins, etc.) in 212 core foods sampled in 2007-2009. The food items analyzed during TDS2 were defined from the INCA2 nomenclature and covered about 90% of the entire French diet (Sirot et al. 2009). Sampling took account of seasonality and geographic variability. The management of left-censored data under different hypotheses (lower-bound (LB) and upper-bound (UB)), the hypotheses of speciation drawn for some substances and how the estimated daily intakes were calculated are detailed in Supplemental Method 3.

The Health-Based Guidance Values (HBGVs) considered were those defined in the TDS2 (Anses 2011b) or, when more recent, values determined in Anses opinions and in the HBGV database (Anses 2016c; Anses 2016e; Anses 2018). The risks associated with dietary exposure to each chemical were evaluated by calculating the percentage of individuals exceeding HBGVs and their 95% confidence intervals (CI95%), or, in the case of a benchmark dose lower limit (BMDL) by calculating the corresponding margin of exposure (MOE) according to international recommendations (EFSA 2005). In the present study, the substances considered were those for which a risk was identified in the population before or after 20 steps of the stepwise models. We chose not to consider certain pesticides which have been banned since TDS2 as the occurrence data are no longer appropriate. Moreover, those pesticides were not detected during more recent studies (Anses 2016c) using lower limits of detection than those applied in TDS2.

The PRIME (Preventable Risk Integrated Model) (Scarborough et al. 2014b) is a scenario model that links behavioral risk factors with mortality from noncommunicable diseases (NCD), either directly or mediated by body mass index (BMI), blood cholesterol or blood pressure. This was used to assess the effects of the modifications simulated under scenarios N and P on premature NCD mortality (mainly diet-related cardiovascular diseases, cancers and diabetes). For the analyses reported in this paper, the following dietary risk factors were included: fruit, vegetables, fiber, total fat, saturated fat, polyunsaturated fat, monounsaturated fat, dietary cholesterol and salt. The French population in 2006 was considered in order to fit with the population in the dietary survey. The input variables were adjusted for energy intake using the residual method (Willett et al. 1997), as the

PRIME model is highly sensitive to even small variations in energy intake (Cobiac et al. 2018), whereas dietary surveys involve considerable inaccuracy with respects to energy intake estimates. To assess the difference between SN and SP regarding premature deaths avoided, we calculated, for each individual at each step, the difference between SN and SP for each parameter, which we called $\delta\text{SN-SP}$. Then we added the $\delta\text{SN-SP}$ to the observed value, to assess the effect of the difference between the two scenarios, and used the PRIME model to estimate the number of premature death avoided by the difference between SN and SP. A Monte Carlo simulation was performed to estimate 95% credible intervals around the results. Credible intervals (CI) were estimated, based on the 2.5th and 97.5th percentiles of results generated from 105 iterations of the PRIME models, where the estimates of relative risks used to parameterize the model were allowed to vary stochastically according to the distributions reported in the literature.

3. Results

3.1. Contribution of different food groups to total protein intake

After 20 steps in the SN, the mean ($\pm$ SD) plant protein intake remained constant among men, and fell from 31.5% ($\pm$ 7.7) to 29.4% ($\pm$ 7.2) ($P < 0.0001$) of total protein intake among women. In the SP, the mean plant protein intake rose from 30.8% ($\pm$ 8.4) and 31.5% ($\pm$ 7.7) to 36.7% ($\pm$ 8.5) and 38.7% ($\pm$ 7.9) ($P < 0.0001$) in men and women, respectively. The mean contribution to protein intake of high-fat meat, high-fat poultry, deli meat, sandwiches and bread decreased in men and women under both scenarios. The mean contribution to fatty fish, pizzas and quiches and legumes increased in both sexes and both scenarios. The contribution of lean meat (women only), lean poultry, yogurts and prepared dishes (men only) increased in SN only, whereas the contribution of pasta and vegetables (women only) increased in SP only (**Fig. 1**).

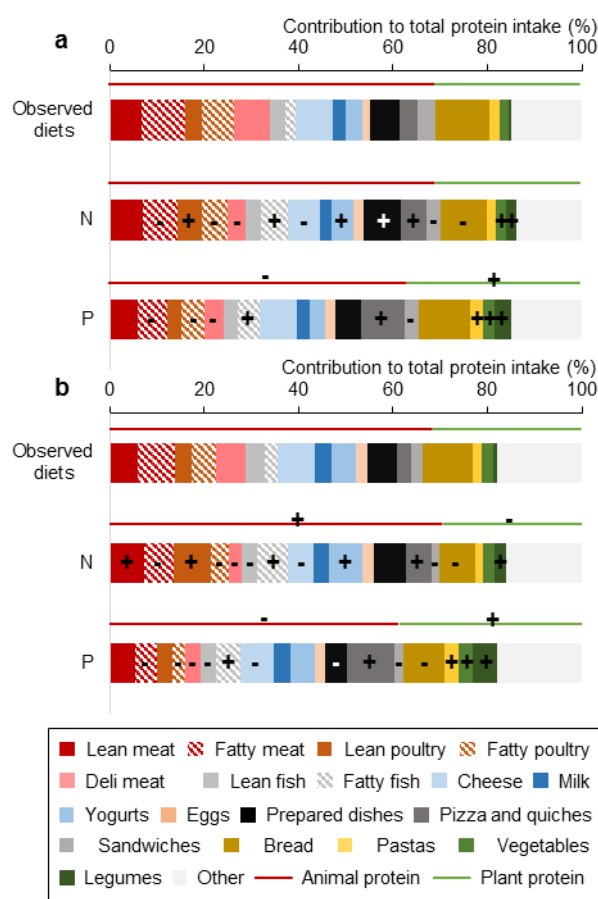


Fig. 1 Mean contributions (%) of different food groups to protein intake in the observed diets and rearranged diets after 20 steps of the stepwise model in men (a) and women (b) in the INCA2 population (2006-2007) (n=1,678). Under scenario N, dual changes to portion size (i.e. a reduction in one protein food and an increase in another) were permitted between foods already consumed by the individual and “new” protein foods could be also introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these foods formed part of the food

repertoire of the cluster to which the individual belonged. Scenario P was the same except that the overall percentage of plant protein in individual diets had to increase at each iteration. “+” means that the mean contribution was higher than in the observed diets and “-” means it was lower, as tested by pairwise post hoc comparisons with Bonferroni correction ($P < 0.05$). For example, after 20 steps under scenario N in women, lean meat contributed to 7.4% of total protein intake in men, which was significantly higher than the 5.9% recorded in the observed diets. The food groups shown contributed to >2% of total protein intake in at least one gender in the observed diets, SN or SP.

The highest rates of increase were for legumes (+225%), fatty fish (+151%) and lean poultry (+82%) in SN and for legumes (+502%), pizzas and quiches (+190%) and fatty fish (+102%) in SP. Likewise, the highest rates of decrease were for deli meat (-52%), sandwiches (-31%) and cheese (-25%) in SN, and for deli meat (-49%), high-fat meat (-38%) and high-fat poultry (-37%) in SP.

3.2. Nutrient adequacy

The two scenarios significantly increased overall nutrient adequacy, as assessed using the PANDiet score in both men and women. The increase in the PANDiet score was smaller ($P < 0.0001$) under SP (5.9 and 6.5 points) than SN (6.9 and 8.0 points) in men and women, respectively (**Table 1**). The AS increase was higher under SN than SP in both men and women, which was explained by higher increases in PAs for EPA+DHA, iron, iodine, potassium, zinc, riboflavin, vitamin B-6 and B-12 but lower PAs for fiber and folate. The rise in the MS was similar under both SN and SP, because of similar PAs for total fat, SFA and sodium.

Table 1. Mean PANDiet, AS, MS and probabilities of adequacy of the observed diets and rearranged diets after 20 steps of the stepwise model under SN and SP among men and women in the INCA2 population ($n=1,678$)^{1,2}.

Nutrient	Men			Women		
	Observed diets	Scenario N	Scenario P	Observed diets	Scenario N	Scenario P
PANDiet score	64.8 ± 0.2 ^a	71.6 ± 0.2 ^b	70.6 ± 0.2 ^c	63.2 ± 0.2 ^a	71.2 ± 0.2 ^b	69.7 ± 0.2 ^c
Adequacy Subscore	66.9 ± 0.4 ^a	75.6 ± 0.3 ^b	73.6 ± 0.4 ^c	62.1 ± 0.4 ^a	72.8 ± 0.3 ^b	69.3 ± 0.4 ^c
Protein	98.7 ± 0.2 ^a	99.7 ± 0.1 ^b	99 ± 0.2 ^a	97.5 ± 0.2 ^a	99.5 ± 0.1 ^b	98 ± 0.2 ^a
ALA	7 ± 0.6 ^a	7 ± 0.6 ^a	7.1 ± 0.6 ^a	11.3 ± 0.7 ^a	10.6 ± 0.7 ^a	11.1 ± 0.7 ^a
LA	53.5 ± 1.3 ^a	53.2 ± 1.3 ^a	49.6 ± 1.3 ^a	63.1 ± 1.1 ^a	61.5 ± 1.1 ^{ab}	58.6 ± 1.1 ^b
EPA+DHA	28.3 ± 1.2 ^a	74.7 ± 1.2 ^b	63.2 ± 1.3 ^c	27.6 ± 1 ^a	68.9 ± 1.1 ^b	54.2 ± 1.1 ^c
DHA	32.7 ± 1.3 ^a	78.6 ± 1.3 ^b	68.7 ± 1.3 ^c	32.6 ± 1.1 ^a	73.9 ± 1.1 ^b	60.3 ± 1.2 ^c
Fiber	29.8 ± 1.2 ^a	42 ± 1.3 ^b	49.1 ± 1.3 ^c	17 ± 0.8 ^a	24.7 ± 1 ^b	35.1 ± 1 ^c
Calcium	66.4 ± 1.3 ^a	77.8 ± 1.1 ^b	78.3 ± 1.1 ^b	56.3 ± 1.2 ^a	70.1 ± 1.1 ^b	69.5 ± 1.1 ^b
Copper	84.3 ± 0.8 ^a	91.7 ± 0.6 ^b	92.4 ± 0.5 ^b	87.1 ± 0.7 ^a	94.4 ± 0.4 ^b	94.6 ± 0.4 ^b
Iron	85 ± 0.6 ^a	91.9 ± 0.4 ^b	87.2 ± 0.5 ^c	49.8 ± 0.8 ^a	69.4 ± 0.7 ^b	54.7 ± 0.8 ^c
Iodine	68.5 ± 1.1 ^a	83.2 ± 0.8 ^b	77.9 ± 0.9 ^c	54.4 ± 1 ^a	74.1 ± 0.8 ^b	65.1 ± 0.9 ^c
Potassium	76.6 ± 1 ^a	85.6 ± 0.8 ^b	81.8 ± 0.9 ^c	53.3 ± 1.1 ^a	67.4 ± 1 ^b	61.1 ± 1.1 ^c
Magnesium	36.5 ± 1.2 ^a	45.6 ± 1.2 ^b	45.7 ± 1.2 ^b	40.1 ± 1.2 ^a	50.5 ± 1.2 ^b	51 ± 1.2 ^b
Manganese	88.1 ± 0.5 ^a	90.9 ± 0.5 ^b	93.7 ± 0.4 ^c	85.7 ± 0.6 ^a	88 ± 0.5 ^b	92.4 ± 0.4 ^c
Phosphorus	99.8 ± 0.1 ^a	99.9 ± 0.1 ^a	99.9 ± 0.1 ^a	99.8 ± 0 ^a	100 ± 0 ^b	99.9 ± 0 ^a
Selenium	95.9 ± 0.4 ^a	99 ± 0.1 ^b	98.3 ± 0.2 ^b	91 ± 0.6 ^a	98.1 ± 0.1 ^b	96.1 ± 0.3 ^c

Zinc	35.7 ± 1.2 ^a	46.7 ± 1.3 ^b	33 ± 1.2 ^a	34.6 ± 1 ^a	56.7 ± 1.1 ^b	37.5 ± 1 ^a
Vit.A	62.6 ± 1.3 ^a	77.8 ± 1 ^b	81.1 ± 0.9 ^b	65.2 ± 1.1 ^a	78.6 ± 0.9 ^b	80.8 ± 0.8 ^b
Vit.B-1	97.5 ± 0.2 ^a	98.9 ± 0.1 ^b	98.4 ± 0.2 ^b	97.9 ± 0.1 ^a	99.3 ± 0.1 ^b	99.1 ± 0.1 ^b
Riboflavin	83.9 ± 0.9 ^a	94.3 ± 0.5 ^b	89.7 ± 0.7 ^c	70.9 ± 1 ^a	89.6 ± 0.5 ^b	79.3 ± 0.8 ^c
Vit.B-3	100 ± 0 ^a	100 ± 0 ^a	100 ± 0 ^a	100 ± 0 ^a	100 ± 0 ^a	100 ± 0 ^a
Vit.B-5	90.2 ± 0.5 ^a	96.5 ± 0.3 ^b	93.5 ± 0.4 ^c	90.9 ± 0.4 ^a	97.8 ± 0.2 ^b	94.8 ± 0.3 ^c
Vit.B-6	73.5 ± 1.2 ^a	88.8 ± 0.8 ^b	79.3 ± 1.1 ^c	64.1 ± 1.1 ^a	87 ± 0.7 ^b	73.7 ± 1 ^c
Folate	68.5 ± 1.2 ^a	86 ± 0.8 ^b	89.9 ± 0.7 ^c	60 ± 1.1 ^a	78.6 ± 0.9 ^b	85.1 ± 0.8 ^c
Vit.B-12	83.5 ± 0.9 ^a	95.8 ± 0.3 ^b	89.4 ± 0.6 ^c	65.3 ± 1.1 ^a	89.8 ± 0.6 ^b	73 ± 0.9 ^c
Vit.C	34.8 ± 1.4 ^a	37 ± 1.5 ^a	37.6 ± 1.5 ^a	36.9 ± 1.3 ^a	38 ± 1.3 ^a	38.3 ± 1.3 ^a
Vit.D	3.4 ± 0.4 ^a	8.2 ± 0.6 ^b	5.5 ± 0.5 ^c	2.2 ± 0.2 ^a	3.9 ± 0.3 ^b	3 ± 0.3 ^a
Vit.E	86.4 ± 0.7 ^a	91.8 ± 0.5 ^b	91.4 ± 0.5 ^b	89.1 ± 0.5 ^a	92.5 ± 0.4 ^b	92.4 ± 0.4 ^b
Moderation Subscore	62.6 ± 0.3 ^a	67.7 ± 0.4 ^b	67.6 ± 0.4 ^b	64.4 ± 0.3 ^a	69.7 ± 0.3 ^b	70.2 ± 0.3 ^b
Protein	96.1 ± 0.4 ^a	97.4 ± 0.2 ^b	97.9 ± 0.2 ^c	97.5 ± 0.3 ^a	97.7 ± 0.2 ^a	98.3 ± 0.2 ^b
Carbohydrates	98.4 ± 0.2 ^a	99 ± 0.1 ^a	98.7 ± 0.2 ^a	98.6 ± 0.2 ^a	99.1 ± 0.1 ^a	98.9 ± 0.1 ^a
Sugar	62.6 ± 1.4 ^a	62.5 ± 1.4 ^a	62.5 ± 1.4 ^a	75.5 ± 1 ^a	74.6 ± 1 ^a	74.7 ± 1 ^a
Total Fat	86.6 ± 0.9 ^a	95.2 ± 0.5 ^b	95.1 ± 0.5 ^b	83 ± 0.8 ^a	94.6 ± 0.4 ^b	94.6 ± 0.4 ^b
SFA	20.7 ± 1 ^a	33.2 ± 1.2 ^b	33.8 ± 1.2 ^b	19.4 ± 0.8 ^a	32.3 ± 1 ^b	33.9 ± 1 ^b
Sodium	13 ± 0.7 ^a	19.7 ± 0.9 ^b	19 ± 0.9 ^b	12.8 ± 0.5 ^a	20.5 ± 0.8 ^b	21.4 ± 0.8 ^b

¹All values are means ± SEMs; n = 1,678. ANOVA indicated a significant effect of the type of scenario for each variable. Among men or among women (but not between), labeled means without a common letter differ, as tested by pairwise post hoc comparisons with Bonferroni corrections.

²ALA, Alpha-Linolenic acid; DHA, Docosahexaenoic Acid; EPA, Eicosapentaenoic acid; LA, Linoleic Acid; SFA, Saturated Fatty Acids; Vit., Vitamin

3.3. Diet costs and GHGE

When comparing observed diets with the rearranged diets resulting from SN, the mean diet cost increased from €8.4 and €6.5/d to €9.2 and €7.4/d among men and women, respectively. Under SP, the mean cost of the rearranged diets did not significantly change in men and slightly increased in women (€6.7/d). Among both men and women, the mean diet cost was lower under SP than SN. The rise in diet cost under SN could mainly be explained by an increase in the intake of fatty fish (+€0.44 and +€0.35/d for men and women, respectively), prepared dishes (+€0.28 and +€0.20/d for men and women, respectively), and lean poultry (+€0.14 and +€0.30/d for men and women, respectively). The trend towards a higher diet cost under SP could mainly be explained by an increase in the intake of pizzas and quiches (+€0.36 and +€0.14/d for men and women, respectively) and fatty fish (+€0.28 and +€0.20/d for men and women, respectively).

Under SN, mean GHGE levels increased from 6.3 and 4.5 kg eq. CO₂/d to 6.5 and 5.1 kg eq. CO₂/d, for men and women, respectively. Conversely, under SP, mean GHGE levels decreased (to 5.9 and 4.3 kg eq. CO₂ for men and women, respectively) (**Fig. 2**). Under SN, the rise in GHGE levels could mainly be explained by an increase in the intake of lean meat (+0.10 and +0.32 kg eq. CO₂/d for men and women, respectively) and prepared dishes (+0.21 and +0.14 kg eq. CO₂/d for men and women, respectively). Under SP, the fall of GHGE levels could mainly be explained by a reduction in the intake of high-fat meat (-0.38 and -0.35 kg eq. CO₂/d for men and women, respectively) and deli meat (-0.10 and -0.07 kg eq. CO₂/d for men and women, respectively).

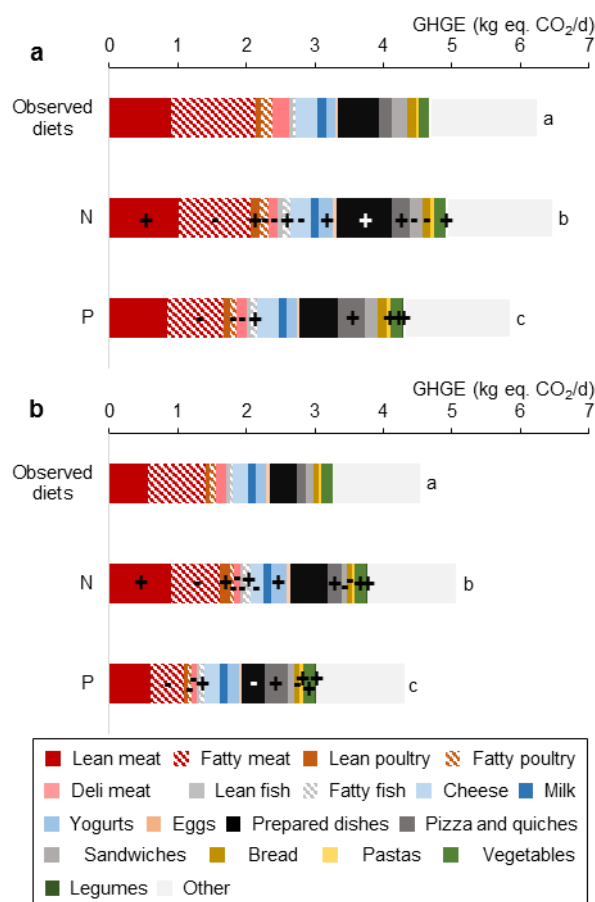


Fig. 2 Mean GHGE levels associated with observed diets and rearranged diets after 20 steps of the stepwise model under scenarios N and P among men (a) and women (nb) in the INCA2 population (n=1,678). Under scenario N, dual changes in portion size (i.e. a reduction in one protein food and an increase in another) were permitted between foods already consumed by the individuals and “new” protein foods could be introduced to balance reductions in the protein foods consumed, inasmuch as these new foods formed part of the food repertoire of the cluster to which the individual belonged. Scenario P was the same except that it was necessary for the overall percentage of plant protein in individual diets to increase at each iteration. “+” means that the mean contribution was higher than in the observed diets and “-” means it was lower, as tested by pairwise post hoc comparisons with Bonferroni correction ($P < 0.05$). Labeled means without a common letter differ, as tested by pairwise post hoc comparisons with Bonferroni correction ($P < 0.05$). Men and women were stratified so that the labels of men and women were independent. The food groups shown contributed to $>2\%$ of total protein intake in at least one gender in the observed or rearranged diets, and gained or lost $>1\%$ in the rearranged diets.

3.4. Risks related to exposure to food contaminants

A risk (as a percentage of the population >HBGV significantly different from 0) was identified for 13 substances in the observed diets or at least one of the scenarios and hypotheses for censored data. However, under the LB hypothesis, the risks related to exposure to acrylamide, cadmium, chromium VI, methylmercury and sulfites did not differ between under SN and SP and the observed diets. In SP only, the risk related to mycotoxins increased (Deoxynivalenol (DON) in men in LB and UB and T2 + HT-2 in women, in UB only). The risks related to exposure to dioxins, furans and PCB-DL increased in SN only for both sexes and the risk related to PCB-NDL increased for men only in SN. Finally, the risks related to lindane exposure decreased in SP for women only, and the risk related to nickel exposure increased in SN and was higher in SP than in SN and the observed diet in women (**Table 2**).

Table 2. Risks related to exposure to food contaminants (as a percentage of the population >HBGV) under the lower bound (LB) and upper bound (UB) hypotheses in the observed and rearranged diets after 20 steps of the stepwise model in scenarios N and P (SN and SP) among men and women in the INCA2 population (n=1,678)^{1,2}

Substance	HBGV	Men (% > HBGV [95% CI])						Women (% > HBGV [95% CI])					
		Observed diets		SN		SP		Observed diets		SN		SP	
		LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB
Acrylamide (heat-generated compound)	2 µg/kg bw/d (Anses 2016e; EFSA 2015a)	0.6 [0;1.1] ^a	0.6 [0;1.1] ^a	0.6 [0;1.1] ^a	0.6 [0;1.1] ^a	0.6 [0;1.1] ^a	0.6 [0;1.1] ^a	0.7 [0.2;1.3] ^a	0.7 [0.2;1.3] ^a	0.7 [0.2;1.3] ^a	0.7 [0.2;1.3] ^a	0.7 [0.2;1.3] ^a	0.7 [0.2;1.3] ^a
Cadmium (trace element)	2.5 µg/kg bw/week (Anses 2016f; EFSA 2009a)	0.3 [-0.1;0.6] ^a	0.3 [-0.1;0.6] ^a	0.3 [-0.1;0.7] ^a	0.9 [0.2;1.6] ^a	0.4 [-0.1;0.8] ^a	0.7 [0.1;1.3] ^a	1.3 [0.6;2] ^a	1.3 [0.6;2.1] ^a	1.9 [1;2.8] ^a	2 [1.1;2.9] ^a	2.9 [1.8;4] ^a	3.3 [2.2;4.5] ^b
Chromium VI (trace element)	1 µg/kg bw/d (Anses 2016e; EFSA 2014)	0	0.4 [-0.1;0.9] ^a	0	0.4 [-0.1;0.9] ^a	0	0.4 [-0.1;0.9] ^a	0	0.9 [0.3;1.4] ^a	0	0.9 [0.3;1.4] ^a	0	0.9 [0.3;1.4] ^a
Deoxynivalenol (mycotoxin)	1 µg/kg bw/d (Anses 2016f; JECFA 2011)	0.2 [-0.1;0.5] ^a	0.3 [-0.1;0.7] ^a	1.1 [0.3;1.9] ^a	1.5 [0.6;2.4] ^a	1.2 [0.4;2] ^b	2.4 [1.3;3.5] ^b	0.5 [0;0.9] ^a	0.6 [0.1;1.1] ^a	0.5 [0.1;1] ^a	1 [0.3;1.6] ^a	1.5 [0.7;2.3] ^a	2.1 [1.2;3] ^a
Dioxins, Furans and PCB-DL (POP)	2 pg TEQ _{WHO} /kg bw/week (EFSA 2018)	93.1 [91.3;95] ^a	95.2 [93.6;96.7] ^a	98.3 [97.4;99.3] ^b	99 [98.2;99.7] ^b	95.6 [94;97.1] ^a	96.4 [95;97.7] ^a	94.7 [93.3;96.1] ^a	96.1 [94.9;97.3] ^a	97.6 [96.7;98.6] ^b	98.6 [97.8;99.3] ^b	93.7 [92.1;95.2] ^a	95.8 [94.5;97.1] ^a
HT2 + T2 (mycotoxin)	0.06 µg/kg bw/d (Anses 2016f; JECFA 2001)	0	7.7 [5.7;9.6] ^a	0	8.8 [6.7;10.9] ^a	0	11 [8.7;13.3] ^a	0	4 [2.8;5.2] ^a	0	5 [3.7;6.4] ^a	0	7.4 [5.7;9] ^b
Lindane (pesticide)	0.01 µg/kg bw/d (Anses 2016f; ATSDR 2005)	5.7 [4;7.4] ^a	100 [100;100] ^a	4.5 [3;6] ^a	100 [100;100] ^a	4 [2.6;5.4] ^a	100 [100;100] ^a	4.2 [2.9;5.5] ^a	100 [100;100] ^a	3.6 [2.4;4.8] ^a	100 [100;100] ^a	1.5 [0.7;2.3] ^b	100 [100;100] ^a

Methyl-mercury (trace element)	1.3 µg/kg bw/week (Anses 2016e; EFSA CONTAM Panel 2012)	1.1 [0.3;1.9] ^a	1.1 [0.3;1.9] ^a	1.8 [0.8;2.7] ^a	1.8 [0.8;2.7] ^a	0.9 [0.2;1.5] ^a	0.9 [0.2;1.5] ^a	1.7 [0.9;2.6] ^a	1.7 [0.9;2.6] ^a	1.9 [1;2.8] ^a	1.9 [1;2.8] ^a	1.7 [0.9;2.6] ^a	1.7 [0.9;2.6] ^a
Nickel (trace element)	2.8 µg/kg bw/d (Anses 2016f; EFSA CONTAM Panel 2015b)	17.5 [14.7;20.3] ^a	36.5 [33;40] ^a	21.5 [18.5;24.6] ^a	48.9 [45.2;52.6] ^b	23 [19.9;26.1] ^b	50.1 [46.5;53.8] ^b	17.9 [15.4;20.3] ^a	43.6 [40.5;46.8] ^a	26.6 [23.8;29.4] ^b	54.5 [51.3;57.6] ^b	32.6 [29.7;35.6] ^c	59.5 [56.4;62.6] ^b
PCB-NDL (POP)	10 ng/kg bw/d (AFSSA 2007b; Anses 2016f)	0.4 [- 0.1;0.9] ^a	0.4 [- 0.1;0.9] ^a	1.8 [0.8;2.7] ^b	1.8 [0.8;2.7] ^b	0.6 [0.1;1.2] ^a	0.6 [0.1;1.2] ^a	0.8 [0.3;1.4] ^a	0.8 [0.3;1.4] ^a	2 [1.1;2.9] ^a	2 [1.1;2.9] ^a	0.8 [0.3;1.4] ^a	0.8 [0.3;1.4] ^a
Sulfites (additives)	700 µg/kg bw/d (Anses 2011b; EFSA CONTAM Panel 2016)	3.8 [2.4;5.2] ^a	3.8 [2.4;5.2] ^a	3.8 [2.4;5.2] ^a	3.8 [2.4;5.2] ^a	3.8 [2.4;5.2] ^a	3.8 [2.4;5.2] ^a	0.7 [0.2;1.2] ^a	0.7 [0.2;1.2] ^a	0.7 [0.2;1.2] ^a	0.7 [0.2;1.2] ^a	0.7 [0.2;1.2] ^a	0.7 [0.2;1.2] ^a

¹ ANOVA indicated a significant effect of the type of scenario for each variable. Labeled means without a common letter indicate a significant difference between the scenarios (but not between men and women, or LB and UB), as tested by pairwise post hoc comparisons with Bonferroni corrections.

² HBGV, Health-Based Guidance Value; LB, Lower-bound; PCB-DL, PolyChlorinated Biphenyl Dioxin Like; PCB-NDL, PolyChlorinated Biphenyl Non-Dioxin Like; POP, Persistent Organic Pollutant; SP, scenario P; SN, scenario N; UB, Upper-bound

The risks related to acrylamide, chromium VI, inorganic arsenic and lead were characterized using the calculation of MOEs based on BMDLs. In the observed diet, the MOEs for acrylamide at the 95th percentile were around 150 for men and women, and slightly decreased in SN and SP. The MOEs for chromium VI at the 95th percentile were between 1,641 and 2,844 for men and women under LB and UB, and were the same in the observed diet, SN and SP. Thus the MOEs were <10,000 and a risk could not be ruled out for acrylamide and chromium VI. The MOEs for inorganic arsenic at the 95th percentile ranged from 0.45 to 16.22 for men and women under LB and UB, which was too low to rule out a health risk. The MOE fell in SN and SP, leading to a higher risk related to inorganic arsenic exposure. The MOEs of lead at the 95th percentile were <10 in the observed diet which indicated a risk related to lead exposure, and decreased in the rearranged diets using both scenarios for men and women (**Table 3**).

Table 3. Risks related to exposure to food contaminants (as a margin of exposure (MOE) at the 95th percentile) under the LB and UB hypotheses for substances for which the risk was characterized using a benchmark dose lower limit in the observed and rearranged diets under scenarios N and P for men and women in the INCA2 population (n=1,678)¹

Substance	BMDL (µg/kg bw/d)	Men (MOE)						Women (MOE)					
		Observed diet		SN		SP		Observed diet		SN		SP	
		LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB	LB	UB
Acrylamide (heat-generated compound)	BMDL ₁₀ = 170 (Anses 2016f; EFSA CONTAM Panel 2015a)	151.5	150.4	148.5	147.9	148.6	147.8	148.9	148.3	147.0	144.0	147.0	144.0
	Range BMDL ₀₁ = 0.3 – 8	0.61	0.51	0.61	0.51	0.59	0.50	0.54	0.45	0.53	0.44	0.53	0.44
Inorganic arsenic (trace element)	(Anses 2016f; EFSA CONTAM Panel 2009b)	16.22	13.73	16.38	13.50	15.74	13.46	14.30	12.02	14.15	11.71	14.03	11.65
	BMDL ₁₀ = 1000												
Chromium VI (trace element)	(Anses 2016f; EFSA CONTAM Panel 2014)	2844	2210	2844	2210	2844	2210	2056	1641	2056	1641	2056	1641
Lead (trace element)	BMDL ₁₀ = 1.5 (Anses 2016f; EFSA CONTAM Panel 2010)	4.63	3.92	4.45	3.79	4.38	3.68	4.86	3.80	4.39	3.54	4.10	3.42
	BMDL ₁₀ = 0.63	1.94	1.64	1.87	1.59	1.84	1.55	2.04	1.60	1.84	1.49	1.72	1.44
	BMDL ₁₀ = 0.50	1.54	1.31	1.48	1.26	1.46	1.23	1.62	1.27	1.46	1.18	1.37	1.14

¹ BMDL, Benchmark dose lower limit; LB, Lower-bound hypothesis; MOE, Margin Of Exposure; UB, Upper-bound hypothesis; SP, Scenario P; SN, Scenario N

The differences in risk related to contaminant exposure could be explained by the differences in intake of a few food groups. Indeed, the contribution of fatty fish to exposure to dioxins, furans and PCB-DL increased from 13% in the observed diet to 21% and 31% in the rearranged diets under SP and SN, respectively. The contribution of fatty fish to methylmercury exposure also increased from 10% in the observed diet to 18% and 26% under SP and SN, respectively, while its contribution to PCB-NDL rose from 23% in the observed diet to 35% and 47% under SP and SN, respectively. The contribution of bread to cadmium exposure fell from 21% in the observed diet to 17% and 16% under SN and SP, respectively, with concomitant increases in the contributions of vegetables (from 10% to 14% and 16%), legumes (from 0% to 1% and 3%) and pizza (from 2% to 4% and 7%). The contribution of pizza to DON exposure rose from 6% in the observed diet to 13% and 20% under SN and SP, respectively. The contributions to nickel exposure of legumes (from 1% to 5% and 9%) and pizza (from 1% to 3% and 5%) increased in the observed diet, SN and SP, respectively. The contribution of pizza to inorganic arsenic increased from 2% in the observed diet to 5% and 8% under SN and SP, respectively. Finally, the contribution of legumes to lead exposure increased from 1% in the observed diet to 4% and 6% under SN and SP, respectively.

3.5. Avoidance of premature deaths

Using the PRIME model, we predicted that the diet modifications after 20 steps of rearrangement would avoid 1,667 [CI 95% 1,354;1,984] premature deaths under SN (1,325 [1,076;1,576] men and 343 [277;410] women) and 2,173 [1,701;2,637] under SP (1,666 [1,311;2,016] men and 507 [385;627] women) when compared to the observed diets (**Fig.3**).

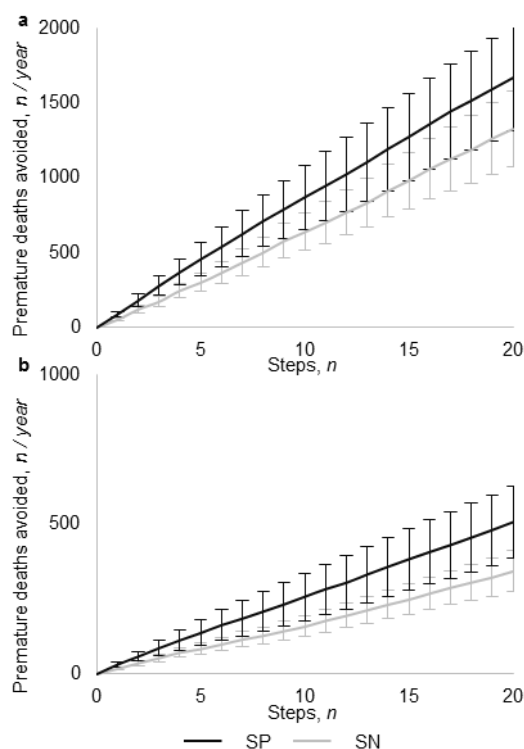


Fig. 3 Annual numbers of premature deaths (and credible intervals) avoided in the 2006 French population by implementation of the dietary modifications under scenarios N (SN) and P (SP), as estimated by the PRIME model, for men (a) and women (b)

These premature deaths were mainly linked to changes in serum cholesterol levels (44% of deaths avoided under SN and SP) and fiber intake (35% under SN and 49% under SP), mainly leading to an avoidance of cardiovascular diseases (92% of deaths avoided under SN and 89% under SP). When assessing the impact of the differences between SN and SP, we predicted that the SP would avoid 511 [281;813] more premature deaths per year than the SN.

4. Discussion

This study identified that targeting the rearrangements that increased nutrient adequacy towards an increase in the percentage of plant protein intake (i.e. in SP vs SN) led to a smaller increase in overall nutrient adequacy but better values in terms of sustainability indicators in a French representative population.

The constraint of increasing the percentage of plant protein at each step caused certain differences regarding the intakes of food groups: under SP, the intake of lean meat, lean poultry and yogurts did not increase, that of fatty fish increased less than under SN and the intake of pizzas, pasta, vegetables and legumes was much higher than under SN. These differences explained most of the differences between the two rearranged diets in terms of the sustainability parameters studied. Indeed, a higher intake of lean meat and poultry under SN explained the better PAs for iron, zinc and vitamin B-12, but a higher cost and higher GHGEs when compared to SP. A higher fatty fish intake under SN led to higher PAs for EPA + DHA, a higher cost of the diet and a higher risk related to dioxins, furans and PCBs when compared to SP. A higher intake of pizzas, bread, legumes and vegetables explained the higher PAs for fiber and folates, the lower cost, lower GHGEs but some trends towards higher risk regarding exposure to mycotoxins and nickel under SP when compared to SN. Under SP, the higher intake of vegetables and fiber and lower intake of dietary cholesterol explained the smaller estimated number of deaths avoided.

The results regarding specific food groups were in line with French national dietary guidelines, which recommend limiting red meat intake and markedly reducing deli meat intake while increasing that of fatty fish, legumes and vegetables (Anses 2016e). However, as pizzas were consumed by a large part of the population in the observed diets, the pizza intake rose markedly, particularly under SP. However, it appeared that when the selected modifications consisted of an increase of a portion size of pizza (or the introduction of a small portion of pizza), 53% of the foods which had their portion size reduced in parallel were deli meats, which contained more salt and SFA and less calcium, zinc, fiber and vitamin B-9 than pizzas. As a result, our results should not be interpreted as meaning that pizzas are a “healthy food”, but that they are simple substitute when gradually reducing the consumption of deli meat in order to increase overall nutrient adequacy. Conversely, the increases in portions of legumes were mostly limited to clusters that contained legumes in their cluster repertoires. This underlines that account must be taken of both initial dietary patterns and the acceptability of the change, as we discussed previously (de Gavelle et al. 2019). Furthermore, it has been argued elsewhere that the consumption of plant protein from existing sources is more likely to increase in groups that are already consuming them (Niva et al. 2017). The change model used here indeed reflected this reality of a barrier to change by allowing increases among

actual consumers or by introducing these foods into the apparent repertoire of likely consumers only.

The SN findings revealed that increasing overall nutrient adequacy, even by means of minor changes, led to a higher diet cost (+11%) and higher GHGE levels (+7%) than in the observed diets, which was in line the fact that the different sustainability parameters are not always compatible with each other (Perignon et al. 2017). For example, observational studies (also conducted as part of the INCA2 study) showed that diets with high nutritional quality were associated with significantly higher diet-related GHGEs than low nutritional quality diets (Vieux et al. 2013), or that the higher quality diets were associated with higher costs and higher GHGEs (Masset et al. 2014). However, Seconda et al. identified, on a large observational French cohort, that the diets with the lowest GHGE were also diets with the lowest cost and high nutritional quality (Seconda et al. 2018). Our finding that the SP diets generated lower GHGE than the SN and observed diets shows that favoring plant protein in change scenarios is a pivotal factor even when only simple and moderate changes to protein patterns are considered. This finding therefore well complements those of previous studies which demonstrated much lower GHGE and higher nutrient adequacy with plant-based diets than with typical western diets, and reductions in GHGE in the context of more radical change models involving plant-based diets (Biesbroek et al. 2018; Macdiarmid et al. 2012; Scarborough et al. 2014a; Springmann et al. 2016; Tilman and Clark 2014). In our study the parallel decrease in GHGE levels and the number of deaths avoided when an increase in the percentage of vegetable proteins was constrained in the rearranged diets (SP vs SN) was in line with previous findings regarding an increase in plant protein intake or a reduction in animal protein intake (Perignon et al. 2017). For example, under a scenario in the UK where the proportions of vegetarians was doubled and the rest of the sample adopted a dietary pattern that was low in red and processed meats, the health risk of colorectal cancer was significantly reduced (Aston et al. 2012). Likewise, in the EPIC-NL cohort, replacing 35 g of meat/day with an equal amount of vegetables, fruits, fish, or cereal/rice/couscous lowered GHGE levels and decreased the all-cause mortality risk (Biesbroek et al. 2014). The contaminants identified as involving a significant risk were almost the same as in the French TDS2 (Anses 2011b; Nougadère et al. 2012), except for nickel, for which no risk was identified in TDS2, and dioxins and dioxin-like PCBs, for which the risk was much lower in TDS2 (which was published before the HBGVs for nickel and dioxins and dioxin-like PCBs were markedly revised downwards) (EFSA CONTAM Panel 2015b; EFSA CONTAM Panel 2018).

When comparing SP with SN in our study, there was a lower overall nutrient adequacy but a higher number of deaths were avoided, which could be understood as a discordance between nutrition-related indicators. However, these indicators fundamentally differ. The PRIME model is based on 7 nutrients and account for fruit

and vegetable intakes, whereas the PANDiet score takes account of 32 nutrients and no food group, at least directly. The PANDiet also does not include cholesterol, as no reference value has been set by Anses (Anses 2011a), the EFSA (EFSA Panel on Dietetic Products 2010), or the Dietary Guidelines for Americans (U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture 2015). The PANDiet was not developed to predict mortality but rather nutritional status and security and it accounts for many nutrients that have little direct association with a risk of disease. The PRIME model was a better indicator than the PANDiet in terms of predicting the number of premature deaths avoided, but did not account for morbidity and other health effects related to the intake of other important nutrients whose intakes were increased by the PANDiet score. Nor did the PRIME model account for potential premature deaths linked to exposure to food contaminants at levels higher than HBGVs.

The strengths of this study were that nutrient adequacy was assessed using the most precise estimates of the probabilities of adequacy for each nutrient, using the most recently published nutrient reference values and taking account of the bioavailability of iron and zinc and the digestibility of protein. The rearrangements were realistic because changes to portion sizes have been acknowledged as being highly acceptable (Bianchi et al. 2018; Poquet et al. 2017; Vanhonacker et al. 2013)), they remained within the food repertoires of clusters of individuals sharing similar dietary protein patterns (de Gavelle et al. 2019), and they were limited to 20 changes of portion sizes (each food having around 5 portions sizes), which limited the deviation from observed diets. Very few studies have implemented such acceptability constraints. Horgan et al. have designed constraints aiming at modeling, firstly, changes of portions sizes, then adding new foods and finally removing foods, which was in line with the hypotheses in our study (Horgan et al. 2016). However, our findings have some limitations and uncertainties. We chose scenarios which considered that the introduction of a food not already consumed by individuals but consumed by a cluster of people with a similar dietary pattern was acceptable, which had not been tested. However, this could be viewed as a probabilistic approach to identify foods that were indeed consumed by individuals but were not found in their records covering a 7-day period. The difference of death avoided between SP and SN could not be tested statistically as the PRIME model uses distributions of the uncertainty of parameters, and does not account for inter-individual variability. However, the estimate of the premature death avoided by the difference between SN and SP had a credible interval that did not include 0, and thus we concluded that SP avoided more premature deaths than SN. The food and contamination data concerned the period 2006-2009 and did not provide precise information on the foods considered (for example if the food was organic or produced locally). This lead to uncertainties about the extrapolation of the results to the current situation, as food intake profiles have evolved since 2006 (e.g. the mean intake of organic foods has increased between 2006-2007 and 2014-2015 (Anses 2017)).

Another limitation affecting this study is that we considered that the food prices were not affected by the rearrangements, which would not be true in the case of changes involving the entire population. Indeed, under our modeling of an increase in legume consumption in the population (x6 under SP), the price of legumes would have increased in line with demand. Yet, changes in food intakes remain limited. Finally, the sustainability parameters considered during this study were not all-encompassing as many environmental parameters (eutrophication, water footprint, land use or biodiversity indicators, etc.) were not included. Although reductions in environmental footprints indicators such as land and water use were associated with those of GHGE with more sustainable dietary patterns involving restrictions on animal-based foods (Aleksandrowicz et al. 2016; Pimentel and Pimentel 2003), we did not measure these indicators during the study, or any other non-environmental indicators of sustainability.

In summary, we were able to identify that modifications to portion sizes of protein foods in the diets of French adults that markedly improved the overall nutrient adequacy. The risk related to exposure to contaminants did not evolve to any great extent except for dioxins, furans and nickel, and most changes were dependent on the intake of specific food groups such as fatty fish, bread, pizzas, vegetables and legumes. Introducing constraints to increase the intake of plant protein slightly limited the improvement in nutrient adequacy but gave rise to more marked reductions in the number of premature deaths avoided and improvements in other sustainability parameters (diet-related GHGEs and diet cost).

Contributors

The authors' contributions were as follows - E.G., J-F.H. and F.M. designed research, with the contribution of C.O. and L-G.S. E.G., M.P., P.L., J-F.H. and F.M. conducted the research; P.L., V.S. and L-G.S. provided essential materials; E.G., M.P. and P.L. analyzed data and performed statistical analysis; E.G., J-F.H., V.S., C.O., H.F., L-G.S. and F.M. wrote the paper; E.G. and F.M. had primary responsibility for final content.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

References

- AFSSA (2007) Avis de l'Afssa relatif à l'établissement de teneurs maximales pertinentes en polychlorobiphényles qui ne sont pas de type dioxine (PCB "non dioxin-like", PCB-NDL) dans divers aliments. (saisine n°2006-SA-0305):28
- Aleksandrowicz L, Green R, Joy EJM, Smith P, Haines A (2016) The Impacts of Dietary Change on Greenhouse Gas Emissions, Land Use, Water Use, and Health: A Systematic Review PLoS One 11:e0165797 doi:10.1371/journal.pone.0165797
- Amirabdollahian F, Ash R (2010) An estimate of phytate intake and molar ratio of phytate to zinc in the diet of the people in the United Kingdom Public Health Nutr 13:1380-1388
- Anses (2011a) Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2006sa0359Ra.pdf> Rapport d'expertise collective
- Anses (2011b) Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) - <https://www.anses.fr/fr/system/files/PASER2006sa0361Ra2.pdf> Rapport d'expertise collective
- Anses (2016a) Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles - www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf Rapport d'expertise collective
- Anses (2016b) ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016 - Retrieved 12/01/2017 from the Ciqua homepage <https://ciqual.anses.fr/>
- Anses (2016c) Étude de l'alimentation totale infantile - <https://www.anses.fr/en/content/infant-total-diet-study-itds> Rapport d'expertise collective
- Anses (2016d) Étude de l'alimentation totale infantile - Tome 2 – Partie 1 Méthodologie, limites et incertitudes - Annexe 7 - <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2010SA0317Ra-Tome2-Part1.pdf> Rapport d'expertise collective
- Anses (2016e) Updating of the PNNS guidelines: revision of the food-based dietary guidelines - <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-1EN.pdf> Anses opinion - Collective expert report
- Anses (2016) Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles - www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf Rapport d'expertise collective
- Anses (2017) Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf> Rapport d'expertise collective
- Anses (2018) TRVs built and chosen by Anses - database - <https://www.anses.fr/fr/content/vtr-construites-et-choisies-par-l%E2%80%99Anses-base-de-donn%C3%A9es>. Maisons-Alfort
- Appleby PN, Key TJ (2016) The long-term health of vegetarians and vegans Proc Nutr Soc 75:287-293 doi:10.1017/s0029665115004334
- Armah SM, Carriquiry A, Sullivan D, Cook JD, Reddy MB (2013) A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults J Nutr 143:1136-1140 doi:10.3945/jn.112.169904
- Aston LM, Smith JN, Powles JW (2012) Impact of a reduced red and processed meat dietary pattern on disease risks and greenhouse gas emissions in the UK: a modelling study BMJ Open 2 doi:10.1136/bmjopen-2012-001072

ATSDR (2005) Toxicological Profile for Alpha-, Beta-, Gamma, and Delta-hexachlorocyclohexane Agency for Toxic Substances and Disease Registry

Bianchi F, Garnett E, Dorsel C, Aveyard P, Jebb SA (2018) Restructuring physical micro-environments to reduce the demand for meat: a systematic review and qualitative comparative analysis *The Lancet Planetary Health* 2:e384-e397 doi:[https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30188-8](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30188-8)

Biesbroek S et al. (2014) Reducing our environmental footprint and improving our health: greenhouse gas emission and land use of usual diet and mortality in EPIC-NL: a prospective cohort study *Environmental Health* 13:27 doi:10.1186/1476-069x-13-27

Biesbroek S, Monique Verschuren WM, van der Schouw YT, Sluijs I, Boer JMA, Temme EHM (2018) Identification of data-driven Dutch dietary patterns that benefit the environment and are healthy *Climatic Change* 147:571-583 doi:10.1007/s10584-018-2153-y

Burlingame B, Dernini S Sustainable Diets and Biodiversity: Directions and Solutions for Policy, Research and Action. International Scientific Symposium, Biodiversity and Sustainable Diets United Against Hunger. In, FAO Headquarters, Rome, Italy, 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO),

Centre d'Information des Viandes (2005) INAPORC : Etude nutritionnelle de la viande de porc fraiche. <http://www.lessentieldesviandes-pro.org>. Accessed 08/03/2017

Centre d'Information des Viandes & INRA (2009) Valeurs nutritionnelles des viandes. <http://www.lessentieldesviandes-pro.org/pdf/PDF-tous%20morceaux.pdf>. Accessed 08/03/2017

Cleveland DA, Gee Q (2017) 9 - Plant-Based Diets for Mitigating Climate Change. In: Mariotti F (ed) *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*. Academic Press, pp 135-156. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803968-7.00009-5>

Cobiac L, Irz X, Leroy P, Réquillart V, Scarborough P, Soler L-G (2018) Accounting for consumers' preferences in the analysis of dietary recommendations *Eur J Clin Nutr* doi:10.1038/s41430-018-0317-5

Darmon N, Drewnowski A (2015) Contribution of food prices and diet cost to socioeconomic disparities in diet quality and health: a systematic review and analysis *Nutr Rev* 73:643-660 doi:10.1093/nutrit/nuv027

de Gavelle E, Huneau J-F, Bianchi C, Verger E, Mariotti F (2017) Protein Adequacy Is Primarily a Matter of Protein Quantity, Not Quality: Modeling an Increase in Plant:Animal Protein Ratio in French Adults *Nutrients* 9:1333

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

de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F (2019) The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults *J Nutr* doi:10.1093/jn/nxy275

Dubuisson C, Lioret S, Touvier M, Dufour A, Calamassi-Tran G, Volatier J-L, Lafay L (2010) Trends in food and nutritional intakes of French adults from 1999 to 2007: results from the INCA surveys *Br J Nutr* 103:1035-1048

EFSA (2005) Opinion of the Scientific Committee on a request from EFSA related to a harmonised approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic *EFSA Journal* 3:282

EFSA CONTAM Panel (2009a) Cadmium in food - Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain *EFSA Journal* 7:980 doi:10.2903/j.efsa.2009.980

EFSA CONTAM Panel (2009b) Scientific Opinion on Arsenic in Food EFSA Journal 7:1351 doi:doi:10.2903/j.efsa.2009.1351

EFSA CONTAM Panel (2010) Scientific Opinion on Lead in Food EFSA Journal 8:1570 doi:doi:10.2903/j.efsa.2010.1570

EFSA CONTAM Panel (2012) Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food EFSA Journal 10:2985 doi:doi:10.2903/j.efsa.2012.2985

EFSA CONTAM Panel (2014) Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of chromium in food and drinking water EFSA Journal 12:3595 doi:doi:10.2903/j.efsa.2014.3595

EFSA CONTAM Panel (2015a) Scientific Opinion on acrylamide in food EFSA Journal 13:4104 doi:doi:10.2903/j.efsa.2015.4104

EFSA CONTAM Panel (2015b) Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of nickel in food and drinking water EFSA Journal 13:4002 doi:doi:10.2903/j.efsa.2015.4002

EFSA CONTAM Panel (2016) Scientific Opinion on the re-evaluation of sulfur dioxide (E 220), sodium sulfite (E 221), sodium bisulfite (E 222), sodium metabisulfite (E 223), potassium metabisulfite (E 224), calcium sulfite (E 226), calcium bisulfite (E 227) and potassium bisulfite (E 228) as food additives EFSA Journal 14:4438 doi:doi:10.2903/j.efsa.2016.4438

EFSA CONTAM Panel (2018) Risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food EFSA Journal 16:e05333 doi:10.2903/j.efsa.2018.5333

EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2010) Scientific Opinion on Dietary Reference Values for fats, including saturated fatty acids, polyunsaturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, trans fatty acids, and cholesterol EFSA Journal 8:1461 doi:10.2903/j.efsa.2010.1461

FranceAgriMer (2015) Impact de la crise économique sur la consommation de viande et évolution des comportements alimentaires Les synthèses de FranceAgriMer 21

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

Godfray HCJ et al. (2018) Meat consumption, health, and the environment Science 361 doi:10.1126/science.aam5324

Hallberg L, Hulthen L (2000) Prediction of dietary iron absorption: an algorithm for calculating absorption and bioavailability of dietary iron Am J Clin Nutr 71:1147-1160

Hartikainen H, Pulkkinen H (2016) Summary of the chosen methodologies and practices to produce GHGE-estimates for an average European diet Natural Resources and Bioeconomy Studies 58

Horgan GW, Perrin A, Whybrow S, Macdiarmid JI (2016) Achieving dietary recommendations and reducing greenhouse gas emissions: modelling diets to minimise the change from current intakes International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity 13:46 doi:10.1186/s12966-016-0370-1

JECFA Safety evaluation of certain mycotoxins in food: prepared by the Fifty-sixth meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). In: Safety evaluation of certain mycotoxins in food: prepared by the Fifty-sixth meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), 2001.

JECFA Safety evaluation of certain contaminants in food: prepared by the Seventy-second meeting of the Joint

FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). In: Safety evaluation of certain contaminants in food: prepared by the Seventy-second meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), 2011.

Kantar WorldPanel (2006) French household consumer panel—Kantar worldpanel. Available from: <http://www.kantarworldpanel.com/global/Sectors>

Kongkachuichai R, Napatthalung P, Charoensiri R (2002) Heme and Nonheme Iron Content of Animal Products Commonly Consumed in Thailand *J Food Compos Anal* 15:389-398 doi:<http://dx.doi.org/10.1006/jfca.2002.1080>

Macdiarmid JJ, Kyle J, Horgan GW, Loe J, Fyfe C, Johnstone A, McNeill G (2012) Sustainable diets for the future: Can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet? *Am J Clin Nutr* 96:632-639 doi:10.3945/ajcn.112.038729

Masset G, Vieux F, Verger EO, Soler L-G, Touazi D, Darmon N (2014) Reducing energy intake and energy density for a sustainable diet: a study based on self-selected diets in French adults *Am J Clin Nutr* 99:1460-1469 doi:10.3945/ajcn.113.077958

Miller LV, Krebs NF, Hambidge KM (2007) A mathematical model of zinc absorption in humans as a function of dietary zinc and phytate *J Nutr* 137:135-141

Millour S et al. (2011) Pb, Hg, Cd, As, Sb and Al levels in foodstuffs from the 2nd French total diet study *Food Chem* 126:1787-1799 doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.086>

Niva M, Vainio A, Jallinoja P (2017) 10 - Barriers to Increasing Plant Protein Consumption in Western Populations. In: Mariotti F (ed) *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*. Academic Press, pp 157-171. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803968-7.00010-1>

Noël L et al. (2012) Li, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Se and Mo levels in foodstuffs from the Second French TDS *Food Chem* 132:1502-1513 doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.12.009>

Norat T et al. (2005) Meat, Fish, and Colorectal Cancer Risk: The European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition JNCI: Journal of the National Cancer Institute 97:906-916 doi:10.1093/jnci/dji164

Nougadère A et al. (2012) Total diet study on pesticide residues in France: Levels in food as consumed and chronic dietary risk to consumers *Environ Int* 45:135-150 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.02.001>

Orlich MJ, Singh P, Sabaté J, et al. (2013) Vegetarian dietary patterns and mortality in adventist health study 2 *JAMA Internal Medicine* 173:1230-1238 doi:10.1001/jamainternmed.2013.6473

Perignon M, Vieux F, Soler L-G, Masset G, Darmon N (2017) Improving diet sustainability through evolution of food choices: review of epidemiological studies on the environmental impact of diets *Nutr Rev* 75:2-17 doi:10.1093/nutrit/nuw043

Phillips SM, Fulgoni VL, Heaney RP, Nicklas TA, Slavin JL, Weaver CM (2015) Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy *Am J Clin Nutr* 101:1346S-1352S doi:10.3945/ajcn.114.084079

Pimentel D, Pimentel M (2003) Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment *Am J Clin Nutr* 78:660S-663S doi:10.1093/ajcn/78.3.660S

Poquet D, Chambaron-Ginhac S, Issanchou S, Monnery-Patris S (2017) Interroger les représentations sociales afin d'identifier des leviers en faveur d'un rééquilibrage entre protéines animales et végétales : approche psychosociale *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 52:193-201 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cnd.2017.05.002>

- Rohrmann S et al. (2013) Meat consumption and mortality - results from the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition *BMC Med* 11:63 doi:10.1186/1741-7015-11-63
- Scarborough P, Appleby PN, Mizdrak A, Briggs ADM, Travis RC, Bradbury KE, Key TJ (2014a) Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK *Climatic Change* 125:179-192 doi:10.1007/s10584-014-1169-1
- Scarborough P, Harrington RA, Mizdrak A, Zhou LM, Doherty A (2014b) The Preventable Risk Integrated Model and Its Use to Estimate the Health Impact of Public Health Policy Scenarios *Scientifica* 2014:21 doi:10.1155/2014/748750
- Seconda L et al. (2018) Comparing nutritional, economic, and environmental performances of diets according to their levels of greenhouse gas emissions *Climatic Change* 148:155-172 doi:10.1007/s10584-018-2195-1
- Sirot V, Fremy J-M, Leblanc J-C (2013) Dietary exposure to mycotoxins and health risk assessment in the second French total diet study *Food Chem Toxicol* 52:1-11 doi:https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.10.036
- Sirot V, Tard A, Venisseau A, Brosseaud A, Marchand P, Le Bizec B, Leblanc J-C (2012) Dietary exposure to polychlorinated dibenzo-p-dioxins, polychlorinated dibenzofurans and polychlorinated biphenyls of the French population: Results of the second French Total Diet Study *Chemosphere* 88:492-500 doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.03.004
- Sirot V, Volatier JL, Calamassi-Tran G, Dubuisson C, Ménard C, Dufour A, Leblanc JC (2009) Core food of the French food supply: second Total Diet Study *Food Additives & Contaminants: Part A* 26:623-639 doi:10.1080/02652030802695506
- Springmann M, Godfray HCJ, Rayner M, Scarborough P (2016) Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113:4146-4151 doi:10.1073/pnas.1523119113
- Tilman D, Clark M (2014) Global diets link environmental sustainability and human health *Nature* 515:518 doi:10.1038/nature13959
- U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture (2015) 2015–2020 Dietary guidelines for Americans - Available at <http://health.gov/dietaryguidelines/2015/guidelines/> (accessed on 01/03/2018) vol 8th Edition. Washington (DC)
- Vanhonacker F, Van Loo EJ, Gellynck X, Verbeke W (2013) Flemish consumer attitudes towards more sustainable food choices *Appetite* 62:7-16 doi:https://doi.org/10.1016/j.appet.2012.11.003
- Verger EO, Holmes BA, Huneau JF, Mariotti F (2014) Simple Changes within Dietary Subgroups Can Rapidly Improve the Nutrient Adequacy of the Diet of French Adults *J Nutr* 144:929-936 doi:10.3945/jn.113.188284
- Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, Paineau D, Huneau J-F (2012) Evaluation of a diet quality index based on the probability of adequate nutrient intake (PANDiet) using national French and US dietary surveys *PLoS One* 7:e42155
- 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* doi:10.3945/ajcn.112.035105
- Willett WC, Howe GR, Kushi LH (1997) Adjustment for total energy intake in epidemiologic studies *Am J Clin Nutr* 65:1220S-1228S

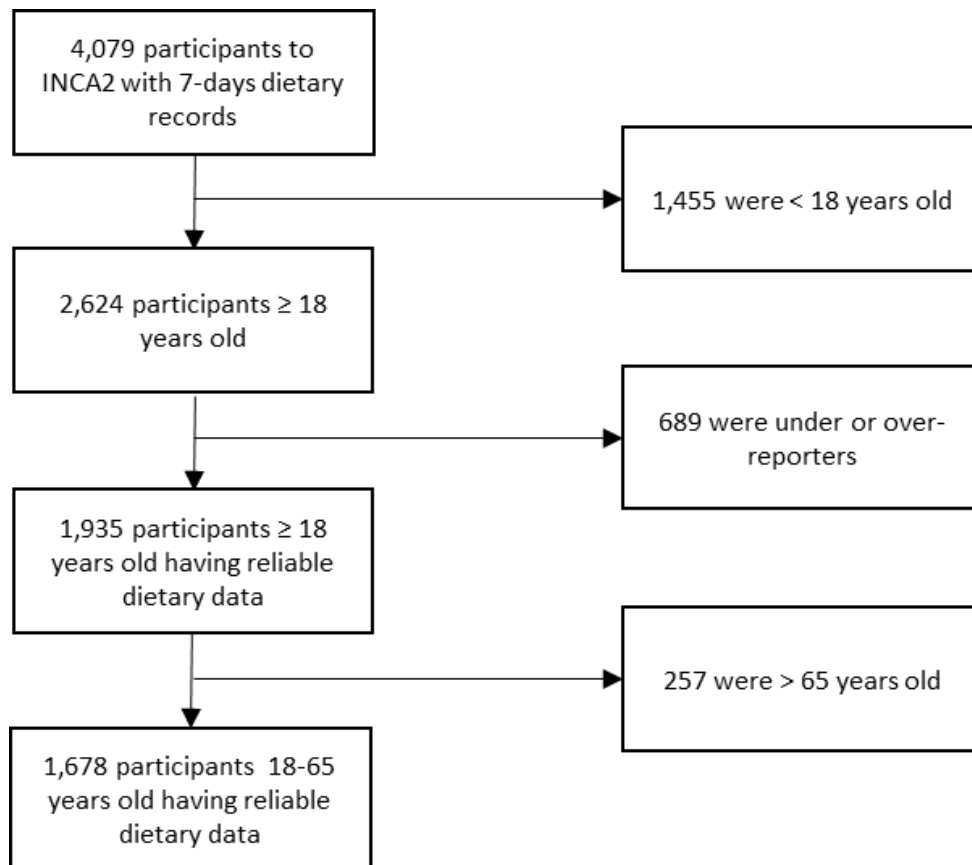
Supplementary material

Modeling gradual changes in protein intake to increase nutrient adequacy leads to greater sustainability when systematically targeting plant protein

Erwan de Gavelle, Pascal Leroy, Marjorie Perrimon, Jean-François Huneau, Véronique Sirot, Caroline Orset, Hélène Fouillet, Louis-Georges Soler, François Mariotti

Author affiliations: UMR PNCA, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005, Paris, France (E.G., M.P., J-F.H., H.F., F.M.), UMR ALISS, INRA, 94200 Ivry-sur-Seine, France (P.L., L-G.S.), ANSES, French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety, 94701 Maisons-Alfort, France (V.S.), Economie Publique, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay, 75005 Paris, France (C.O.)

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



Online Resource 1. Flow chart explaining the sampling of French subjects from the INCA2 study

Online Resource 2. Percentage of food items considered as “protein foods” by food group of the INCA2 nomenclature.

Food groups	Number of protein food items¹ (as % of total food items in the food group)
Meat	35 (100%)
Poultry and game	23 (100%)
Sandwiches, snacks	29 (100%)
Deli meat	53 (96%)
Fish	71 (93%)
Legumes	10 (91%)
Offal	15 (88%)
Prepared dishes	69 (88%)
Cheese	91 (87%)
Eggs and derivatives	11 (85%)
Pizzas, quiches and salted pastries	17 (81%)
Bread and bread products	18 (72%)
Milk	15 (71%)
Pastas	3 (60%)
Dairy products	36 (59%)
Rice or wheat	2 (50%)
Desserts, puddings and milk jelly	13 (41%)
Foods intended for particular nutritional uses	6 (37%)
Dried fruits and oilseeds	8 (32%)
Soups and broths	6 (32%)
Other hot drinks	3 (27%)
Other cereals	1 (25%)
Breakfast cereals	5 (21%)
Other fat	1 (17%)
Potatoes and related	2 (17%)
Coffee	1 (14%)
Vegetables (excl. potatoes)	10 (10%)
Pastries and cakes	4 (9%)
Viennoiserie	1 (8%)
Sweet or savory cookies and bars	1 (3%)
Nonalcoholic soft drinks	1 (2%)
Butter	0 (0%)
Oil	0 (0%)
Margarine	0 (0%)
Fruit	0 (0%)
Ice cream and frozen desserts	0 (0%)
Chocolate	0 (0%)
Sugars and derivatives	0 (0%)
Water	0 (0%)
Alcoholic beverages	0 (0%)
Stewed fruit and compote	0 (0%)
Condiments and sauces	0 (0%)

¹Some foods were excluded as they were ingredients (e.g. gelatin) (n = 9), or were considered to be too expensive (e.g. lobster) (n = 6). Finally, 564 protein foods were accounted for in the models.

Online Resource 3. Implementation of the PANDiet score to the present study. The PANDiet score, expressed as the average of an adequacy subscore (accounting for 27 nutrients), and a moderation subscore (accounting for six nutrients, plus 12 potential penalty values). DHA and EPA + DHA are weighted by 1/2 as DHA is counted twice. Niacin equivalents were calculated as the sum of dietary niacin and 1/60 dietary tryptophan. The upper reference value for sugars excludes lactose. The tolerable upper intake limit for vitamin A concerns retinol only. ALA, Alpha Linolenic Acid. DHA, Docosahexaenoic Acid. EIEA, Energy Intake Excluding Alcohol. EPA, Eicosapentaenoic acid. LA, Linoleic Acid. NE, Niacin Equivalent. SFA, Saturated Fatty Acid.

PANDiet score
Average of Adequacy and Moderation subscores

Adequacy subscore			
Nutrient	Reference value (/day)	Variability	Source
Protein	0.66 g/kg bw	12.5%	(FAO Expert Consultation 2011)
LA	3.08% EIEA	15%	(Anses 2011a)
ALA	0.769% EIEA	15%	(Anses 2011a)
DHA	0.192 g	15%	(Anses 2011a)
EPA + DHA	0.385 g	15%	(Anses 2011a)
Fiber	23 g	15%	(Anses 2016a)
Vitamin A	570 (men) or 490 (women) µg	15%	(Anses 2016a)
Thiamin	0.3 mg/1000 kcal	20%	(EFSA Panel on Dietetic Products 2016b)
Riboflavin	1.3 mg	15%	(EFSA Panel on Dietetic Products 2017)
Niacin	5.44 mg NE/1000kcal	10%	(Anses 2016a)
Panthothenic acid	3.62 (men) or 2.94 (women) mg	30%	(Anses 2016a)
Vitamin B-6	1.5 (men) or 1.3 (women) mg	10%	(EFSA Panel on Dietetic Products 2016c)
Folate	250 µg	15%	(Anses 2016a)
Vitamin B-12	3.33 µg	10%	(Anses 2016a)
Vitamin C	90 mg	10%	(Anses 2016a)
Vitamin D	10 µg	25%	(Anses 2016a)
Vitamin E	5.8 (men) or 5.5 (women) mg	40%	(Anses 2016a)
Calcium	860 (<= 24 y.o) or 750 (>24 y.o.)	15% or 13%	(Anses 2016a)
Copper	1.0 (men) or 0.8 (women) mg	15%	(Anses 2016a)
Iodine	107 µg	20%	(Anses 2016a)
Bioavailable iron	0.95 mg for men and non-menstruating women. Lognormal distribution for menstruating women (See formula in de Gavelle et al. (de Gavelle et al. 2018))		(Anses 2016a)
Magnesium	5 mg/kg bw	15%	(Anses 2016a)

Moderation subscore			
Nutrient	Reference value (/day)	Variability	Source
Protein	2.2 g/kg bw	12.5%	(Anses 2016a)
Total fat	44% EIEA	5%	(Anses 2016a)
SFA	12% EIEA	15%	(Anses 2011a)
Carbohydrates	60.5% EIEA	5%	(Anses 2016a)
Sugars	100 g	15%	(Anses 2016a)
Sodium	3312 (men) or 2483 (women) mg	30%	(Anses 2016a)

Tolerable Upper Intake Limits		Source
Vitamin A	3000 µg	(Anses 2016a)
Niacin	900 mg	(Anses 2016a)
Vitamin B6	25 mg	(Anses 2016a)
Folate	1170 µg	(Anses 2016a)
Vitamin D	100 µg	(Anses 2016a)
Vitamin E	300 mg	(Anses 2016a)
Calcium	2500 mg	(Anses 2016a)
Copper	10 mg	(Anses 2016a)
Iodine	600 µg	(Anses 2016a)
Dissociable magnesium	250 mg	(Anses 2016a)
Selenium	300 µg	(Anses 2016a)
Zinc	25 mg	(Anses 2016a)

Manganese	1.56 (men) or 1.39 (women) mg	40%	(Anses 2016a)
Phosphorus	Calcium (mol) / 1.65 c.f. phosphorus section	7.5% + CV Calcium (mg)	(EFSA Panel on Dietetic Products 2015)
Potassium	2692 mg	15%	(EFSA Panel on Dietetic Products 2016a)
Selenium	54 µg	15%	(Anses 2016a)
Bioavailable zinc	0.642 + 0.038 b.w.	10%	(Anses 2016a)

Online Resource 4. Details about the dual modifications of portions sizes of protein foods.

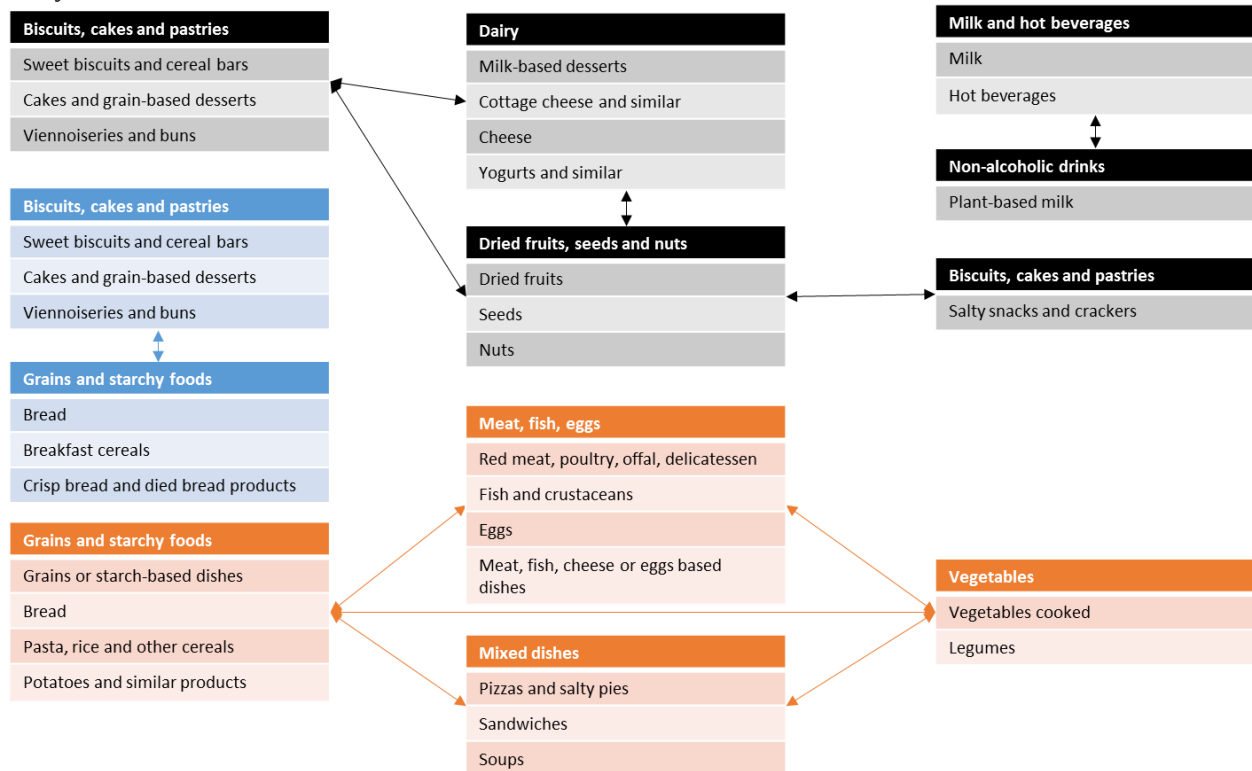
As reported by Bianchi et al. (Bianchi et al. 2018a), the foods were grouped into “serving size sub-groups” ($n = 132$), which corresponded to the sets of foods items consumed at the same time in similar amounts. As the models allowed an increase or decrease in the quantity consumed of the protein foods, possible variations in quantity were defined for each sub-group as “portion size steps”. The portion size step for some sub-groups, defined for foods sold in units or packs (e.g. yogurts) ($n = 18$), was the quantity in one unit or pack. For the other 114 sub-groups, the portion size step was defined as follows:

$$STEP_i = \left(\frac{(P25_i - P10_i) + (P50_i - P25_i) + (P75_i - P50_i) + (P90_i - P75_i)}{4} \right)$$

Each step in the models consisted in decreasing (or increasing) the declared serving size by one portion size step lower (or higher). The quantity of food introduced from outside the food repertoire was one portion size step. The lowest portion permitted when reducing the portion size was 0 g and the highest portion permitted was defined as the 90th percentile of intake of the serving sub-group. The paired modifications of portions were constrained between food groups that could be substituted according to the French cultural meal scheme (e.g. modifications to portions of meat could not be paired with yogurts). The rules of compatibility between food groups for paired modifications, adapted from Bianchi et al. (2018), are described in Supplemental Figure 1.

Finally, the steps of the model in each individual diet could not lead to an increase or decrease in the initial energy intake of more than 10%, and to protein and indispensable amino acids intakes lower than the Estimated Average Requirement.

Online Resource 5. Diagram presenting the possible paired modifications of portion sizes (one protein food gets a lower portion and one protein food gets a higher portion), depending on the meal, between food subgroups belonging to different food groups. The name of the food group is presented in bold in the first row of each box. The names of the food subgroups belonging to the group are presented from the second row to the last row of the box. The paired modifications are allowed between protein foods within the food groups and with other food groups when an arrow connects two food groups only. The paired modifications of portions of protein foods belonging to food subgroups whose name are written in orange are allowed in lunch and dinner only, those whose name are written in blue are allowed in breakfast only and those whose name is written in black are allowed in every occasion.



Online Resource 6

Censored data are defined as values below detection or quantification limits. The censored data were processed according to EFSA, FAO and WHO recommendations (EFSA et al. 2011):

Two concentration assumptions were made: the lower-bound (LB) assumption and the upper-bound (UB) assumption. The low assumption is a scenario where the undetected values are estimated to be 0 and the detected but unquantified values are estimated to be equal to the LOD. The high assumption is a scenario where the undetected values are estimated to be equal to the LOD and the detected but unquantified values are estimated to be equal to the LOQ. The LB scenario is therefore minimalist, the UB scenario maximalist.

As only total arsenic and mercury forms were analyzed, the speciation hypothesis for inorganic arsenic and methylmercury are described as follows:

- for seafood food items, the percentage of inorganic arsenic was taken from the results of French studies on dietary exposure to arsenic (Leufroy et al. 2011; Sirot et al. 2009), as detailed in the iTDS report (Anses 2016e),
- for water, 100% of the arsenic was supposed to be inorganic,
- for the other food items, 70% of the arsenic was supposed to be inorganic, as recommended by the EFSA (European Food Safety Authority (EFSA) 2014).
- for fish items, it was considered that 100% of mercury was methylmercury and 20% inorganic mercury and for mollusks and crustaceans that 80% of mercury was methylmercury and 50% inorganic mercury. For other foods, it was considered that 100% of mercury was inorganic (Anses 2016f).

As in previous publications (de Gavelle et al. 2016; Nougadère et al. 2011), the estimated daily intake (EDI) of each substance “j” for each individual “i” was calculated with a semi probabilistic approach as follows:

$$EDI_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n C_{i,k} \times L_{k,j}}{BW_i} \quad \text{in } \mu\text{g/kg of body weight/day}$$

n: number of foods consumed by individual i for which concentration data are available

$C_{i,k}$: consumption of food item k by individual i (g/day), calculated as an average consumption on the recorded days

$L_{k,j}$: mean level of substance j in food k (if possible regional and seasonal mean) ($\mu\text{g/g}$)

BW_i : body weight of individual i (kg)

Supplemental References

Anses (2011) Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2006sa0359Ra.pdf> Rapport d'expertise collective

Anses (2016a) Étude de l'alimentation totale infantile - Tome 2 – Partie 1 Méthodologie, limites et incertitudes - Annexe 7 - <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2010SA0317Ra-Tome2-Part1.pdf> Rapport d'expertise collective

Anses (2016b) Updating of the PNNS guidelines: revision of the food-based dietary guidelines - <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-1EN.pdf> Anses opinion - Collective expert report

Anses (2016) Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles - www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf Rapport d'expertise collective

Bianchi CM et al. (2018) A clear trade-off exists between the theoretical efficiency and acceptability of dietary changes that improve nutrient adequacy during early pregnancy in French women: Combined data from simulated changes modeling and online assessment survey PLoS One 13:e0194764

de Gavelle E et al. (2016) Chronic dietary exposure to pesticide residues and associated risk in the French ELFE cohort of pregnant women Environ Int 92-93:533-542 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.007>

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

EFSA, FAO, WHO (2011) Towards a harmonised Total Diet Study approach: a guidance document EFSA Journal 9:66 doi:10.2903/j.efsa.2011.2450

EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2015) Scientific opinion on dietary reference values for phosphorus EFSA journal 13:4185 doi:10.2903/j.efsa.2015.4185

EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2016a) Scientific opinion of dietary reference values for potassium EFSA Journal 14:e04592 doi:10.2903/j.efsa.2016.4592

EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2016b) Scientific opinion on dietary reference values for thiamin EFSA journal 14:4653 doi:10.2903/j.efsa.2016.4653

EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2016c) Scientific opinion on dietary Reference Values for vitamin B6 EFSA Journal 14:e04485-n/a doi:10.2903/j.efsa.2016.4485

EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2017) Scientific opinion on dietary Reference Values for riboflavin EFSA Journal 15:e04919 doi:10.2903/j.efsa.2017.4919

European Food Safety Authority (EFSA) (2014) Dietary exposure to inorganic arsenic in the European population EFSA Journal 12:3597 doi:10.2903/j.efsa.2014.3597

FAO Expert Consultation (2011) Dietary protein quality evaluation in human nutrition FAO Food Nutr Pap 92:1-66

Leufroy A, Noël L, Dufailly V, Beauchemin D, Guérin T (2011) Determination of seven arsenic species in seafood by ion exchange chromatography coupled to inductively coupled plasma-mass spectrometry following microwave assisted extraction: Method validation and occurrence data Talanta 83:770-779 doi:<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.10.050>

Nougadère A, Reninger J-C, Volatier J-L, Leblanc J-C (2011) Chronic dietary risk characterization for pesticide residues: A ranking and scoring method integrating agricultural uses and food contamination data Food Chem Toxicol 49:1484-1510 doi:<https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.03.024>

Sirot V, Guérin T, Volatier JL, Leblanc JC (2009) Dietary exposure and biomarkers of arsenic in consumers of

fish and shellfish from France Sci Total Environ 407:1875-1885
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.050>

2.7. Travail personnel n°6bis : Les variations de consommation modélisées suivent-elles les tendances récentes, et quel impact auraient-elles sur la production agricole française à l'horizon 2027 ?

Résumé

Contexte : La consommation de viande a diminué en France entre 2000 et 2017. Les simulations présentées précédemment se basent sur les données de 2006-2007, et ne prennent pas en compte les évolutions depuis cette période. De plus, la faisabilité de ces évolutions en termes de production agricole n'a pas été évaluée.

Objectif : Evaluer, d'une part, si les modifications simulées sur les données de consommation de 2007 suivent les tendances d'évolution de consommation entre 2007 et 2017, et d'autre part, les impacts de ces modifications sur la production agricole française.

Méthode : Les évolutions de consommation des produits issus filières bovine viande, lait, porcine, poulet de chair, blé tendre, blé dur et lentilles des scénarios du travail personnel n°6 (SN et SP) ont été estimées, par rapport à la situation observée. La consommation alimentaire calculée par bilans par la FAO ou Agreste a été utilisée, et les évolutions de consommation des produits de différentes filières ont été appliquées aux données de consommation par bilan de 2007, et comparées aux évolutions réelles jusqu'en 2017. Des coefficients de conversion alimentaires, des rations moyennes et des rendements moyens issus de la littérature ont été utilisés pour évaluer les évolutions de quantité d'aliments végétaux et surfaces liées aux évolutions de consommation alimentaire, en considérant des importations et exportations constantes.

Résultats : Les évolutions de consommation entre 2007 et 2017 simulées suivent les tendances observées pour la viande de volaille dans le SN, et la viande de bœuf, le blé dur et le blé tendre dans le SP. En revanche, elles divergent largement des tendances observées en ce qui concerne les lentilles et la viande de porc. La production française ne semble pas en mesure de supporter les évolutions de consommation simulées dans le SN, ni en termes d'alimentation pour bétail, ni en termes de surfaces disponibles. En revanche, il semble possible de mettre en œuvre les évolutions simulées dans le SP, sauf pour les lentilles où une quantité importante devra être importée pour supporter les évolutions de consommation.

Conclusion : Viser systématiquement plus de protéines végétales lorsqu'on cherche à augmenter l'adéquation nutritionnelle des régimes en modifiant les équilibres protéiques amène à des évolutions de consommation a priori compatibles avec la production agricole française sans changement majeur des modes de conduite des cultures, ce qui n'est pas le

cas sans cela.

Valorisation : Ce travail est un complément du travail personnel n°6 et ne sera pas publié en tant que tel.

Messages-clés

- Les évolutions de consommation d'aliments protéiques simulées lorsqu'on identifie des modifications amenant à une meilleure adéquation nutritionnelle (en visant ou non plus de protéines végétales) ne suivent pas la tendance observée entre 2007 et 2017, particulièrement pour les lentilles et la viande de porc.
- Les modifications diététiques identifiées qui augmentent uniquement l'adéquation nutritionnelle ne semblent pas réalistes dans un scénario où la production française doit compenser ces modifications, car elles supposent une augmentation importante de la quantité d'aliments pour bétail et des surfaces cultivées et pâturées.
- Les modifications diététiques qui améliorent l'adéquation nutritionnelle tout en augmentant le pourcentage de protéines végétales semblent réalistes et pourraient être compensées par la production agricole française.
- La forte hausse de consommation de lentilles nécessaire pour améliorer l'adéquation nutritionnelle ne semble pas pouvoir être compensée par la production française à court terme.

Les variations de consommation modélisées suivent-elles les tendances récentes, et quel impact auraient-elles sur la production agricole française à l'horizon 2027 ?

Erwan de Gavelle¹, Pierre Blanchot^{1,2}, François Mariotti¹, Philippe Lescoat²

¹UMR PNCA, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay

²UMR SAD-APT, AgroParisTech, INRA, Université Paris-Saclay

Introduction

Le travail personnel n°6 a présenté des modélisations de trajectoires acceptables de réarrangement de la consommation de sources de protéines qui augmentaient l'adéquation nutritionnelle des régimes, en visant systématiquement (SP) ou non (SN) plus de protéines végétales. Le scénario SP amenait à une adéquation nutritionnelle moins bonne que le scénario SN, mais à un plus grand nombre de morts prématurées évitées, une moindre émission de gaz à effet de serre, et un prix moindre.

Les données de consommation de cette étude sont issues de l'enquête INCA2, réalisée en 2006-2007, et la consommation de sources de protéines a évolué entre 2006-2007 et 2018. En effet, FranceAgriMer a évalué que la consommation de viande avait diminué de 0,9% par an entre 2008 et 2013, avec un réarrangement des viandes consommées : plus de volaille et moindre de bœuf (1). Ces évolutions seraient les conséquences des crises sanitaires du début des années 2000, de la crise économique de 2007, et plus récemment de la prise de conscience des impacts des niveaux de consommation actuels de viande sur la santé et l'environnement (2). En 2019, de nouveaux repères de consommation ont été publiés par le Haut Conseil de Santé Publique (HCSP), recommandant notamment de limiter la consommation de viande rouge et de charcuterie, et d'augmenter la consommation de légumineuses et fruits à coque (3).

De plus, les variations modélisées prennent en compte l'adéquation nutritionnelle des régimes et l'acceptabilité culturelle des modifications, mais pas la faisabilité des modifications diététiques en termes de production agricole française. En effet, en fonction des filières considérées, la France produit, importe ou exporte plus ou moins de denrées alimentaires, et a plus ou moins de ressources nécessaires à cette production sur le territoire. Par exemple, la France est un des principaux producteurs et exportateurs européen de blé tendre, et peut donc supporter une augmentation de la consommation de blé tendre. En revanche, la France importe plus de lentilles qu'elle n'en produit, et une augmentation de la consommation de lentilles ne serait sans doute pas supportée par la production française à court terme (4, 5).

Il a donc semblé pertinent d'évaluer, d'une part, si les modifications simulées à partir des données de consommation de 2007 pour une prospective en 2027 suivaient les tendances d'évolution de consommation observées entre 2007 et 2017, et d'autre part, quelles modifications de différentes filières de productions agricoles seraient appropriées pour répondre à ces évolutions.

Méthode

Population, consommation et modèles de réarrangement de la consommation

La population, les données de consommation et les modèles pris en compte dans ce travail sont ceux du travail personnel n°6. En résumé, la population est celle de l'étude INCA2 (6, 7), un échantillon représentatif de 1,678 adultes français de moins de 65 ans en 2006-2007. Les participants à cette étude ont renseigné un carnet de consommation de 7 jours, et ces données ont été croisées avec les données de composition des aliments du CIQUAL (8) pour obtenir les apports nutritionnels individuels.

Dans les modèles précédemment décrits, pour chaque individu, des modifications duales ont été simulées. Elles consistaient à réduire la taille de portion d'un aliment protéique tout en augmentant la taille de portion d'un autre aliment protéique. Toutes les modifications a priori acceptables ont été simulées, et l'adéquation nutritionnelle des régimes modifiés ainsi a été calculée à chaque fois. La modification qui augmentait le plus l'adéquation nutritionnelle était intégrée au régime, et ce processus était itéré 20 fois pour limiter l'écart au régime observé. Cette approche correspondait au scénario décrit (SN), et le deuxième scénario reprenait cette approche en ajoutant la contrainte d'augmenter la part de protéines végétales des régimes individuels à chaque itération (SP).

Conversion des aliments en denrées brutes

Pour évaluer les impacts sur les filières agricoles, il a été nécessaire de convertir les aliments consommés en denrées brutes. Pour cela, les aliments composés ont été décomposés en ingrédients en utilisant la base de recette des aliments INCA2 développée par l'Anses, comme décrit dans le travail personnel n°1. Pour convertir les quantités de viande consommées en équivalents carcasse, les coefficients définis dans une publication française récente ont été utilisés pour le bœuf, le porc et la volaille (9), et ceux utilisés par les douanes ont été utilisés pour la charcuterie (10). Ainsi, on a considéré que 1t de viande de bœuf correspondait à 1,3 t équivalent carcasse (tec), 1t de viande de volaille à 1,4t tec, 1t de viande de porc à 1,45 tec, et 1t de charcuterie à 1,6 tec. De même, les coefficients techniques définis par la FAO ont été utilisés pour convertir la quantité de farine et de semoule en quantité de grains (11). On a donc considéré que 1t de blé correspondait à 0,77t de farine et que 1t de blé dur correspondait à 0,83t de semoule. Enfin, le coefficient utilisé par FAOSTAT pour transformer le fromage en équivalent lait (1t de fromage correspond à 4,4t de lait) a été utilisé (4). Une fois ces conversions effectuées, les évolutions de consommation des denrées issues de 7 filières (poulets de chair, bovins, porcs, lait, blé dur, blé tendre et lentille) ont été calculées entre la situation observée et les situations modélisées. Ces 7 filières contribuent à 73% des variations

(en quantité) entre les régimes observés et les régimes modélisés.

Données de disponibilité alimentaire

La disponibilité alimentaire des différentes denrées est calculée en ajoutant les importations à la production, et en soustrayant les exportations, les variations de stock, les pertes, l'alimentation pour bétail et les autres utilisations non-alimentaires. Elle permet ainsi d'estimer la quantité disponible pour l'alimentation de chaque denrée durant une année dans un pays. Les données FAOSTAT (disponibles jusqu'en 2013) ont été utilisées pour le blé et le lait (et équivalents) (4). Les données FAOSTAT ne comprenant que la denrée « blé », et non pas blé dur et blé tendre, nous avons utilisé les bilans de FranceAgriMer sur la production, l'importation et l'exportation de blé dur (dont pâtes) et de blé tendre (dont farine et pâtisseries) pour estimer que 8% du blé disponible pour l'alimentation était du blé dur en France en 2007 (12). Les lentilles n'étaient pas présentes dans les données de bilans alimentaires FAOSTAT. Les lentilles n'ayant pas d'utilisation non-alimentaire, on a ajouté, pour évaluer la disponibilité alimentaire à partir des données FAOSTAT, la production aux importations en soustrayant les exportations. Ces données sont disponibles jusqu'en 2016. De même, Agreste a calculé la disponibilité alimentaire pour les viandes jusqu'en 2017. Les données Agreste ont donc été utilisées pour les bovins viande, porcins et poulets de chair (13).

Les données de disponibilité alimentaire de la France en 2007 sur les 7 filières précédemment évoquées ont été utilisées comme référence, en considérant qu'elles correspondaient à la consommation observée de l'enquête INCA2. Les variations de consommation entre situation observée et situations modélisées ont par la suite été appliquées aux valeurs de disponibilité alimentaire, pour pouvoir comparer la disponibilité alimentaire de la situation observée avec celle des scénarios SN et SP. Dans notre étude, nous avons considéré que la différence entre la disponibilité alimentaire observée et celles des scénarios SN et SP était compensée par la production agricole française, avec des importations et exportations constantes.

De plus, comme le nombre d'itérations des modèles était de 20, nous avons considéré qu'une itération (correspondant à une modification de taille de portion d'un aliment consommé une fois chaque semaine) pouvait être mise en place de façon acceptable chaque année, et donc que les régimes finaux correspondaient à une prospective sur l'année 2027. L'accroissement de la population tel que prévu par l'INSEE pour 2027 a donc été pris en compte en multipliant la disponibilité alimentaire modélisée pour le SN et le SP par 69,5/64 (soit la population française prévue en 2027/ la population observée de 2007) (14).

Coproduction lait-viande

Pour prendre en compte la coproduction de la viande (de veaux et de vaches de réforme) lors de la production de lait, la quantité de viande coproduite lors de la production de 1000L de lait a été évaluée. Pour cela, les données de l'institut de l'élevage ont permis d'évaluer que 64% de la viande bovine produite en France était issue de filière viande et 36% de la filière laitière (15). Les données de production de viande bovine (dont 36% de viande de la filière laitière) et de lait de FAOSTAT de 2007 en France ont ensuite été utilisées pour estimer que 22kg de viande étaient produits pour 1000L de lait (4). Ainsi, les variations de la quantité de lait produit induisent une variation de quantité de viande produite. Par exemple, si une augmentation de la quantité de lait est modélisée, on considère que la production française doit compenser cette augmentation, et donc que la quantité de viande équivalente est produite. Si, dans le même modèle, une diminution de la quantité de viande est modélisée, alors on considèrera que cette viande en moins est issue de la filière viande, en soustrayant également la quantité de viande augmentée issue de la filière lait.

Conversion des variations de quantité de denrées en variations d'aliments végétaux

Une fois les variations de quantités produites nécessaires évaluées à l'horizon 2027, la quantité de denrées végétales nécessaires à cette production a été évaluée. Pour cela, les coefficients de conversion alimentaire (i.e. la quantité d'aliments végétaux nécessaire à produire 1kg de denrée alimentaire animale) estimés par Lesschen *et al.* ont été utilisés (16). Ainsi, on a considéré que 1,2 kg d'aliments pour bétail étaient nécessaires à produire 1 kg de lait, 2,8 kg pour 1 kg d'œufs, 3 kg pour 1 kg ec. de volaille, 3,7 kg pour 1 kg ec. de porc et 17,8 kg pour 1 kg ec. de bovin à viande. Ces chiffres sont beaucoup plus élevés que les indices de consommation (IC) habituellement calculés (9), mais les IC ne prennent en compte que la quantité d'aliments nécessaire à produire du kg de poids vif une fois l'animal productif (e.g. le gain de poids vif, et non le poids vif total). Ainsi les indices de Lesschen *et al.* prennent en compte la nourriture correspondant à la vie entière des animaux, et non à la période productive uniquement. La viande bovine issue de la filière laitière a été considérée comme un coproduit de la production de lait, et donc le coefficient de conversion alimentaire a été estimé à 0 (d'autant plus que les coefficients de Lesschen *et al.* prennent en compte la nourriture nécessaire à produire la viande des vaches laitières, ainsi qu'à nourrir les veaux issus de ces filières). Les rations moyennes issues de l'institut de l'élevage et du centre d'information des viandes ont été utilisées pour la filière bovin lait, bovin viande, porc et poulet de chair (17). Pour les volailles et porcs, les céréales n'étaient pas détaillées au-delà de « toutes céréales ». Les données de l'enquête sur les matières premières utilisées pour la fabrication d'aliments composés d'Agreste ont été utilisées pour préciser la nature des céréales utilisées (18).

Conversion des quantités d'aliments végétaux en surfaces cultivées ou pâturées

Les moyennes entre 2006 et 2008 des rendements issus des statistiques agricoles annuelles (Agreste) ont été utilisées pour estimer la surface cultivée française en nécessaire à produire les aliments végétaux, et donc les aliments animaux (19). Les tourteaux de soja étant essentiellement produits hors de France, les surfaces dédiées à cette production n'étaient pas prises en compte. De même, les coproduits de transformation, par essence, n'ont pas été considérés dans le calcul des surfaces cultivées. En effet, on a considéré que les coproduits étaient produits « de toute façon » avec le produit principal, et que leur valorisation ou non ne changeait pas la surface nécessaire à la production.

Résultats

Tendances d'évolution de la disponibilité alimentaire 2007-2017 et comparaison aux tendances modélisées sur 2007-2027

Les tendances simulées dans les scénarios SN et SP pour la période 2007-2027 ne suivent pas toujours les tendances observée sur 2007-2017 (ou 2007-2013). Dans le SN, la consommation de bœuf (+39%), lait et produits laitiers (+17%) et lentilles (+428%) augmentait plus que la tendance 2007-2017, la consommation de blé dur (+3%) et blé tendre (+9%) augmentait moins que la tendance actuelle. La consommation de porc et charcuterie diminuait (-30%), alors que la tendance ces dernières années était à la stabilisation. Seule la consommation de volaille a évolué dans le SN (+33%) comme les consommations observées. Dans le SP, la consommation de lentilles (+795%), lait et produits laitiers (+14%) augmentait plus que la tendance observée, et la consommation de porc (-29%) et de volaille (-19%) diminuait, contrairement à la tendance observée. La consommation de bœuf (-11%), blé dur (+23%) et blé tendre (+26%) suivait une tendance similaire à celle observée (**Figure 1**).

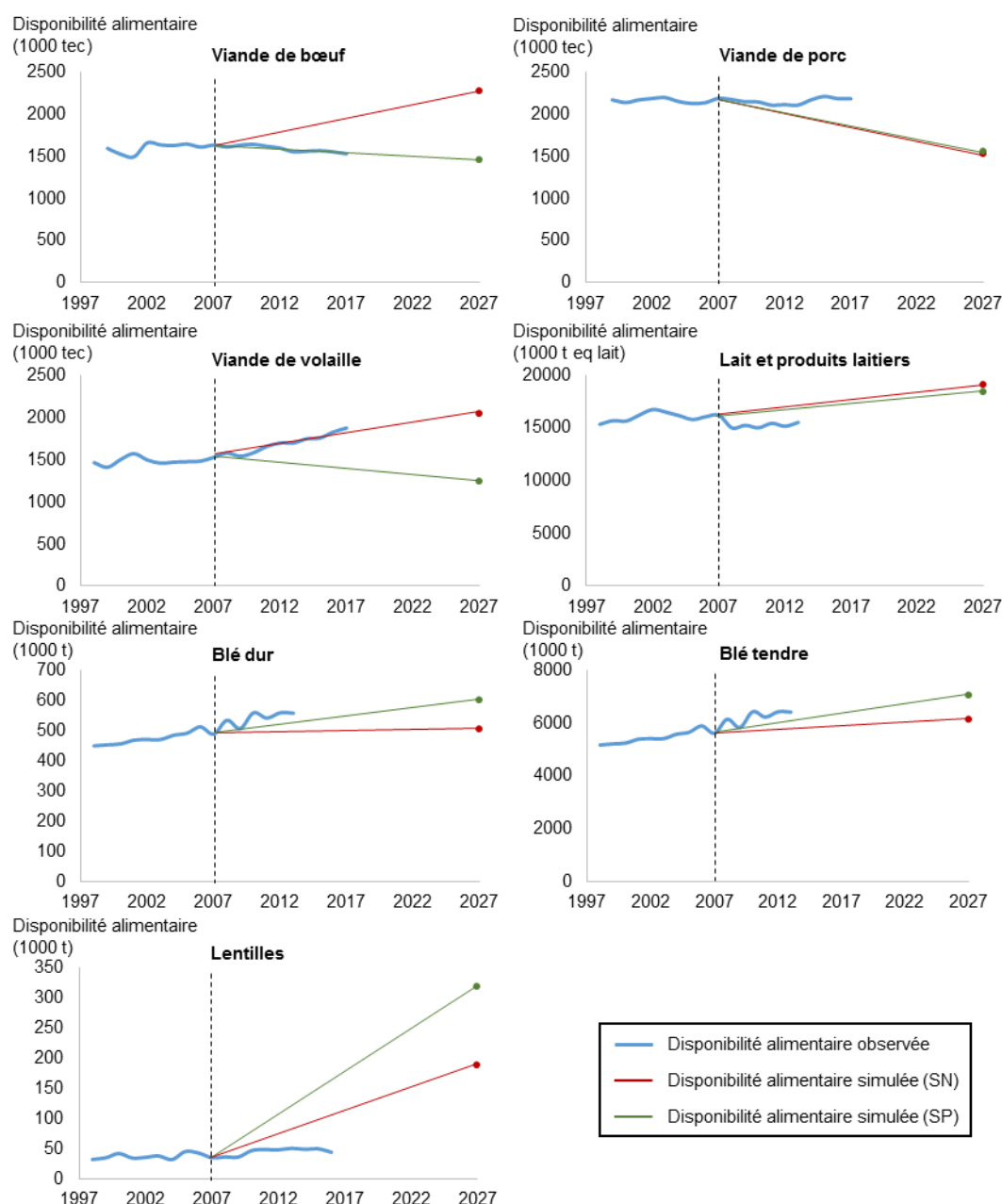


Figure 1. Evolution de la disponibilité alimentaire (ou consommation par bilan) en France entre 1997 et 2017, et évolution telle que simulée dans les scénarios SN et SP jusqu'en 2027, en considérant des importations et exportations constantes. Les données de disponibilité alimentaire sont issues de FAOSTAT pour le blé, le lait et les lentilles, et d'Agreste pour les viandes.

Evolution des quantités de denrées végétales à produire

Dans le SN, les quantités d'herbe pâturée (+ 5 885 000 t) et conservée (+ 4 009 000 t), d'ensilage de maïs (+ 1 823 000 t), de blé tendre (+ 966 000 t), de maïs (+ 220 000 t), de tourteaux de soja (+ 200 000 t) ou de lentilles (+ 152 000 t) à produire pour assurer la

consommation simulée augmentaient, au contraire de la quantité d'orge à produire (- 226 000 t), par rapport à la situation observée en 2007. Dans le SP, seules les quantités d'ensilage de maïs (+ 483 t), de blé tendre (+ 411 t), de lentilles (+ 282 t) et de blé dur (+ 111 t) à produire augmentaient. Au contraire, les quantités d'herbe pâturée (-1 269 t), conservée (- 604 t), maïs (-481 t), tourteaux de soja (-379 t), orge (-251 t), autres tourteaux (- 235 t) ou triticales (- 111 t) diminuaient, par rapport à la situation observée en 2007 (**Figure 2**).

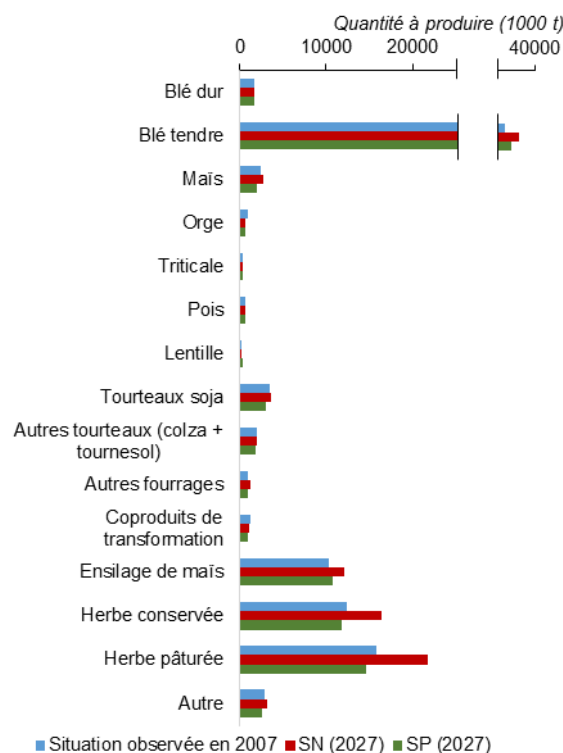


Figure 2. Quantité de denrées végétales à produire pour assurer la production observée d'aliments issus des 7 filières présentées, et les évolutions de consommation simulée dans le SN et le SP, en considérant des importations et exportations constantes.

Evolution des surfaces nécessaires à la consommation alimentaire

Dans le SN, la surface cultivée nécessaire à produire les aliments issus des 7 filières précédemment citées augmente (+ 488 000 ha), tout comme la surface de prairies (+ 1 400 000 ha). Cela s'explique principalement par l'augmentation de la consommation de viande bovine (+281 000 ha de cultures et + 1 199 000 ha de prairies) et de lait et produits laitiers (+191 000 ha de cultures et + 244 000 ha de prairies), malgré une diminution de la consommation de viande de porc et charcuterie (-363 000 ha de cultures). Dans le SP, la surface cultivée nécessaire à produire les aliments augmente (+ 53 000 ha) et la surface de prairies diminue (- 278 000 ha). Cela s'explique principalement par la diminution de la consommation de viande de bœuf (- 111 000 ha de cultures et - 471 000 ha de prairies) et de viande de porc et charcuterie (-353 000 ha de cultures), malgré une hausse de la

consommation de blé tendre (+209 000 ha de cultures) et de lentilles (+231 000 ha de cultures)
(Figure 3).

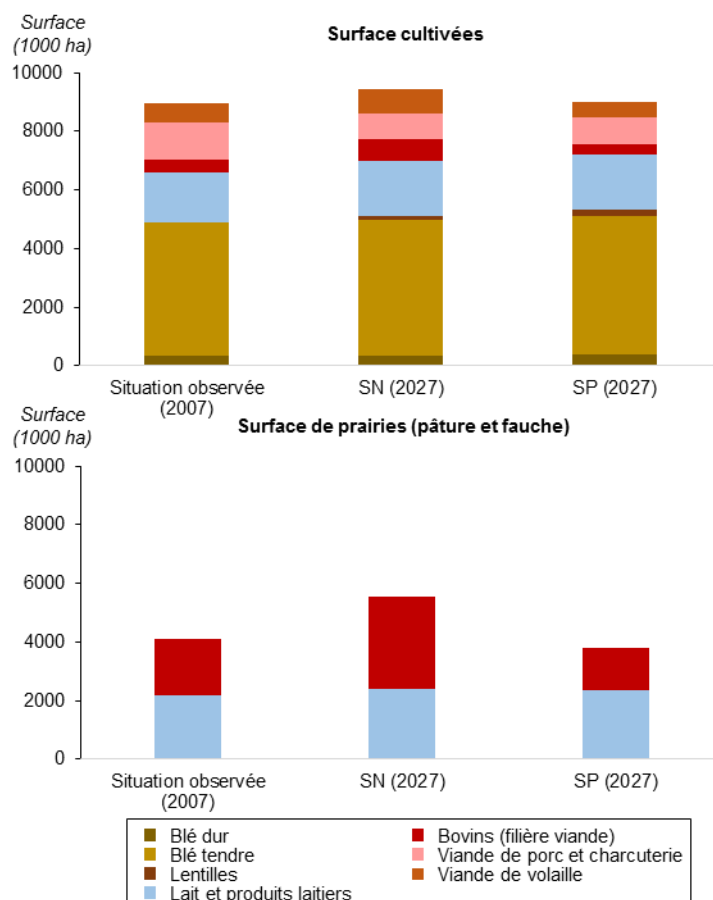


Figure 3. Surface cultivée et surface de prairies observées en 2007 en France liées à la production agricole de blé dur, blé tendre, lentilles, lait et produits laitiers, viande bovine, viande de porc et de volaille, et prospective pour 2027 des surfaces nécessaire pour assurer la consommation simulée d'aliments issus des sept filières dans le SN et le SP, en considérant des importations et exportations constantes. Les surfaces présentées représentent donc la production française, et non la consommation.

Discussion

Les réarrangements de la consommation d'aliments sources de protéines qui augmentent l'adéquation nutritionnelle suivent les tendances d'évolution de consommation depuis 10 ans pour le blé dur (SP), blé tendre (SP), bœuf (SP) et volaille (SN). En revanche, ils dévient des tendances actuelles pour le porc, la volaille (SP), le bœuf (SN), et surtout les lentilles (SN et SP). Du fait de l'augmentation simulée de la consommation de bœuf dans le SN, la quantité d'ensilage de maïs et d'herbe pâturée et conservée à produire augmentent de façon importante, par rapport à la situation observée. En lien avec cela, la surface de cultures nécessaire aux modifications simulées dans le SN augmente légèrement, et la surface de prairies augmente de façon importante. Les modifications du scénario visant systématiquement plus de protéines végétales engendrent une relative stabilité des ressources végétales et des surfaces nécessaires, avec une légère diminution des surfaces de prairies nécessaires.

L'augmentation de la consommation de viande bovine simulée dans le SN ne semble pas réaliste, étant donné la tendance à la baisse de cette consommation depuis le début des années 2000, et l'augmentation très récente de la proportion de « flexitariens » en France (20). De plus, les dernières recommandations du PNNS vont dans le sens d'une diminution globale de la consommation de viande rouge, avec une limite à 500g/semaine (3). La diminution de la consommation de viande de porc simulée dans les deux scénarios ne va pas dans le sens de la tendance actuelle (consommation qui stagne), mais pourrait survenir dans les années à venir, en raison des nouveaux messages du PNNS recommandant de ne pas consommer plus de 150g de charcuterie par semaine, notamment pour réduire le risque de cancer colorectal (21, 22). La diminution de la consommation de viande de volaille simulée dans le SP ne va pas dans le sens des tendances actuelles, ni des recommandations du PNNS. En ce qui concerne les produits laitiers, dans le SN et le SP, la consommation augmente légèrement (moins de 10% hors prise en compte de l'accroissement de population), du fait de l'augmentation de la consommation de yaourt, malgré une baisse de la consommation de fromage. Cette prospective va à l'encontre de la tendance à une diminution de la consommation de produits laitiers depuis 2007, qui s'expliquerait par une évolution des habitudes alimentaires (par exemple la baisse de fréquence de petit déjeuner) (23) et par certains ouvrages « grand public » émettant des doutes sur l'innocuité de la consommation de lait (24), malgré le consensus scientifique sur les bénéfices de cette consommation sur certains paramètres de santé, et aucun effet nocif démontré (21). Les messages les plus récents du PNNS recommandent ainsi la consommation de 2 produits laitiers par jour. Enfin, la consommation de lentilles simulée dans le SN et le SP dévie largement de la tendance dans les dernières années. En effet, les lentilles ont encore une image d'aliment ancien, difficile à

cuisiner, et présentant des inconforts de digestion, et les intérêts nutritionnels de la consommation de légumineuses sont encore peu connus (5). Cependant, dans les dernières années, des initiatives publiques ou privées ont favorisé une augmentation de la consommation de légumineuses. En effet, 2016 a été déclarée année internationale des légumineuses par l'Assemblée générale des Nations unies, les industries agro-alimentaires ont développé des gammes de substituts végétaux à base de légumineuses, et les derniers repères du PNNS ont inclus la consommation de légumineuses au moins deux fois par semaine (3).

La légère augmentation du besoin en blé tendre dans le SN et le SP semble pouvoir être supportée par la production française, d'autant plus que la France exporte la majorité de sa production (25). En revanche, les quantités supérieures (et les surfaces correspondant) d'ensilage de maïs, d'herbe conservée et pâturée dans le SN ne semblent pas pouvoir être compensées par la production française, sans de nouvelles surfaces mobilisables. En effet, la diminution des surfaces nécessaire à l'alimentation des porcs ne suffit pas à offrir des surfaces disponibles pour le maïs ensilage ou les prairies. De plus, la tendance, ces dernières années, n'est pas à une augmentation des surfaces de prairies, mais à une diminution, au profit des espaces artificialisés et des espaces naturels. Les surfaces toujours en herbe des exploitations ont diminué de 430 000 ha entre 2007 et 2016, et les prairies artificielles et temporaires de 17 000 ha (19). Ce besoin d'herbe pâturée et conservée pourrait cependant être partiellement compensé par quelques mesures proposées par l'ADEME, notamment par une augmentation modérée de la charge d'animaux par hectare pour les prairies permanentes peu productives, l'allongement de la durée de pâturage, l'augmentation de la durée des prairies temporaires ou l'introduction de légumineuses fixatrices d'azote dans les couverts (26). L'augmentation de la consommation de viande bovine en France ne pourrait pas non plus être compensée par une baisse des exportations, qui restent faibles (245 000 tec en 2016) par rapport à la production (1 460 000 tec en 2016), la France exportant surtout des animaux vivants (génisses et jeunes bovins) qui sont peu consommés dans le pays (4). Dans le SP, la diminution de la consommation de viande de bœuf semble compenser l'augmentation de la consommation de produits laitiers, en termes d'aliments pour bétail et/ou de surface nécessaire.

Les quantités de lentilles à produire dans le SP et le SN sont largement supérieures aux quantités produites. En effet, en 2016, 27 900 t de lentilles ont été importées en France, pour 21 500 t de production (4). Le développement de la culture de légumineuses permettant de produire les quantités simulées dans le SN ou le SP d'ici 2027 semble peu probable. En effet, la production de légumineuses en France est actuellement majoritairement basée sur des productions de niche, avec signes de reconnaissance et ayant une forte valeur ajoutée, et

donc un prix élevé. Les produits de moyenne gamme, à des prix accessibles par une grande part de la population, ont des difficultés à se développer en France, du fait de la concurrence de l'importation de produits de qualité standard, de la rentabilité peu élevée et de la technicité de la culture (5). Les hausses de consommation simulées seraient donc vraisemblablement couvertes par une hausse des importations en lentilles (principalement du Canada et de Chine). Une augmentation de l'introduction de lentilles dans les rotations de cultures présenterait cependant un réel intérêt environnemental : réduction des apports d'engrais, via la fixation symbiotique de l'azote, diminution de la pression phytosanitaire, amélioration de la qualité du sol et maintien de la biodiversité, ainsi qu'amélioration du bilan énergétique.

Cette étude comporte des limites et incertitudes qu'il convient de souligner. Nous avons associé la disponibilité alimentaire telle que calculée par la FAO pour 2007 à la consommation observée dans INCA2. Les valeurs obtenues en convertissant la consommation d'aliments en équivalents denrées brutes étaient du même ordre de grandeur que les valeurs de disponibilité alimentaire, mais d'environ 20% inférieures. Cette différence s'explique vraisemblablement par les pertes de masse entre l'achat et la consommation (gaspillage alimentaire), ainsi que par les pertes de masse dues à la cuisson. Comme ces pertes sont difficiles à quantifier, et très variable, il nous a semblé plus précis de se baser sur les données de disponibilité alimentaire. Les coefficients de conversion alimentaire ont été calculés au niveau européen, et non français, et ils dépendent largement des systèmes de production et des pays considérés. Cependant, ce sont les seuls chiffres prenant en compte la quantité d'aliment nécessaire à produire les produits animaux en considérant la vie de l'animal et entier, et pas uniquement sa période productive.

Les rations utilisées pour convertir les quantités d'aliments d'origine animale en quantité d'aliments pour animaux sont des rations moyennes. Pour la filière porcine et poulet de chair, si les apports nutritionnels des rations sont stables, les céréales incluses varient en fonction du prix des céréales à un temps donné. Ainsi les rations utilisées ne reflètent pas nécessairement l'année 2007, et ne correspondent pas à une prospective pour l'année 2027. Cependant, les rendements des différentes céréales étant du même ordre de grandeur (ramenées en énergie), les ordres de grandeur des surfaces estimées sont interprétables. Dans un souci de simplification, un certain nombre de paramètres ont été considérés comme constants dans les modèles prospectifs pour 2027 (part de blé dur et blé tendre, part de la viande bovine issue de la filière laitière, coefficients de conversion alimentaire, rendements, rations alimentaires...), or ces paramètres varient chaque année, et sont susceptibles de largement évoluer d'ici 2027. De même, les variations de prix induits par des augmentations de la production, l'importation ou l'exportation de produits n'ont pas été prises en compte. Les

conclusions de cette étude ne sont donc valables que dans les hypothèses définies au départ : en considérant les importations et exportations de 2007 constantes, et donc que seule la production compense les différences de consommation, et en considérant l'ensemble des paramètres comme fixes.

Pour conclure, les modifications de consommation simulées dans le SN ne semblent pas pouvoir être compensées par la production agricole française sans changement majeur des conduites de cultures, principalement du fait de l'augmentation de la consommation de viande bovine. En revanche, les modifications de consommation simulées dans le SP semblent pouvoir être compensées par la production agricole française, et les surfaces affectées à la production des denrées du SP diminuent, par rapport à la situation initiale. En ce qui concerne la production de lentilles, en revanche, la production française ne permettra vraisemblablement pas de couvrir les évolutions de consommation simulées sans évolution majeure de la filière d'ici 2027.

Références

1. FranceAgriMer. Impact de la crise économique sur la consommation de viande et évolution des comportements alimentaires. Les synthèses de FranceAgriMer 2015;21.
2. Latvala T, Niva M, Mäkelä J, Pouta E, Heikkilä J, Kotro J, Forsman-Hugg S. Diversifying meat consumption patterns: Consumers' self-reported past behaviour and intentions for change. *Meat Science* 2012;92(1):71-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.014>.
3. HCSP. Avis relatif à l'évolution des messages sanitaires apposés sur les actions de promotion des acteurs économiques dans le cadre du PNNS 4 - https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcspa20180703_voldesmessandanlecaddelapolnut.p.pdf. Haut Conseil de la Santé Publique, 2018.
4. FAO. FAOSTAT - <http://www.fao.org/faostat/en/#data/CL>. 2018.
5. Solagro. Diagnostic des filières de légumineuses à destination de l'alimentation humaine en France - Intérêt environnemental et perspectives de développement - https://solagro.org/images/imagesCK/files/publications/f12_diagnosticlegumineusesalim.pdf. 2015.
6. Dubuisson C, Lioret S, Touvier M, Dufour A, Calamassi-Tran G, Volatier J-L, Lafay L. Trends in food and nutritional intakes of French adults from 1999 to 2007: results from the INCA surveys. *Br J Nutr* 2010;103(07):1035-48.
7. de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F. The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults. *J Nutr* 2019;149(3):488-96. doi: 10.1093/jn/nxy275.
8. Anses. ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016 - Retrieved 12/01/2017 from the Ciquial homepage <https://ciqual.anses.fr/> 2016.
9. Laisse S, Baumont R, Dusart L, Gaudré D, Rouillé B, Benoit M, Veysset P, Rémond D, Peyraud J-L. L'efficacité nette de conversion des aliments par les animaux d'élevage : une nouvelle approche pour évaluer la contribution de l'élevage à l'alimentation humaine. *INRA Productions Animales* 2019;31(3). doi: 10.20870/productions-animales.2018.31.3.2355.
10. DGDDI. Annexe 5 - Commerce extérieur - Coefficient viande - http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/xls/Annexes_Methodo_Bilan_Viande_renov_2018-2.xls. 2019.
11. FAO. Technical conversion factors for agricultural commodities: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2000.
12. FranceAgriMer. Marché du blé dur - Monde, Europe, France - <http://www.franceagrimer.fr/content/download/23517/194926/file/12%20-%20Brochure%20-%20%20Etude%20sur%20%20le%20march%C3%A9%20du%20bl%C3%A9%20dur.pdf>. Les études de FranceAgriMer 2013.

13. Agreste. Séries longues historiques mensuelles de surfaces, productions, abattages d'animaux, échanges extérieurs, stocks, prix des produits de l'agriculture et des Industries agroalimentaires - <http://agreste.agriculture.gouv.fr/conjoncture/series-mensuelles-bulletin/article/bulletin-mensuel-8485>. 2019.
14. INSEE. Projections de population à l'horizon 2070 - Deux fois plus de personnes de 75 ans ou plus qu'en 2013 - <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/version-html/2496228/ip1619.pdf>. INSEE Première 2016;n°1619.
15. Idele, CNE. Bovins 2017 - Production lait et viande - http://idele.fr/?eID=cmis_download&oID=workspace://SpacesStore/1f82bfd5-7f64-459c-ad78-ee224f574838. Les chiffres clés du GEB 2017.
16. Lesschen JP, van den Berg M, Westhoek HJ, Witzke HP, Oenema O. Greenhouse gas emission profiles of European livestock sectors. *Animal Feed Science and Technology* 2011;166-167:16-28. doi: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.058>.
17. Devun J, Brunschwig P, Guinot C. Alimentation des bovins : rations moyennes et niveaux d'autonomie alimentaire - <http://www.interbev.fr/wp-content/uploads/2012/12/etude-idele-alim-bovins-fr-hd.pdf>. Etude environnement 2015.
18. Agreste. Les matières premières dans les aliments composés pour animaux de ferme en 2015 - <http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur345.pdf>. Agreste Primeur 2017;n° 345.
19. Agreste. Agreste - Statistique agricole annuelle (SAA) - <http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/agreste-donnees-en-ligne>. 2018.
20. Kantar WorldPanel. Le Flexitarisme: les Français et la consommation de produits d'origine animale - <http://www.lafranceagricole.fr/r/Publie/FA/p1/Infographies/Web/2017-12-01/KWP%20pour%20MeatLab%20Charal%20-%20Viande%20Les%20franc%CC%A7ais%20et%20les%20prote%CC%81ines%20animales%20%282%29.pdf> (accessed on 18/12/2018). 2017.
21. Anses. Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles - www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf. Rapport d'expertise collective 2016.
22. Anses. Actualisation des repères du PNNS : révision des repères de consommations alimentaires - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf>. Rapport d'expertise collective 2016.
23. Charby J, Hébel P, Vaudaine S. Les produits laitiers en France : évolution du marché et place dans la diète. *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 2017;52:S25-S34. doi: [https://doi.org/10.1016/S0007-9960\(17\)30196-7](https://doi.org/10.1016/S0007-9960(17)30196-7).
24. Souccar T. Lait, mensonges et propagande: T. Souccar, 2008.
25. FranceAgriMer. Blé tendre - Campagne du 1er juillet au 30 juin - <http://www.franceagrimer.fr/fam/Bibliotheque/INFORMATIONS-ECONOMIQUES/GRANDES->

CULTURES/CEREALES/CHIFFRES-ET-BILANS/2018/Bilans-previsionnels-Ble-dur-Ble-tendre-Orges-et-Mais-pour-la-campagne-2017-2018-du-13-juin-2018. 2018.

26. ADEME. Optimiser la gestion des prairies pour valoriser leur potentiel productif et leurs multiples atouts environnementaux - <https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/10-optimiser-la-gestion-des-prairies-reference-ademe-8131.pdf>. Agriculture et environnement 2015;Fiche n°9.

Chapitre 3 - Discussion

1. Discussion générale

L'objectif de cette thèse était de modéliser les trajectoires acceptables de modification de la consommation de sources de protéines améliorant l'adéquation nutritionnelle des régimes et d'étudier l'impact de ces trajectoires sur des paramètres de durabilité. Ce travail se place dans le contexte spécifique de pays occidentaux où la prévalence des maladies chroniques est croissante, et la part des protéines animales élevée dans les régimes. Un état des lieux des profils de consommation protéique en France et de leur évolution, en lien avec l'adéquation nutritionnelle et les attitudes vis-à-vis des différentes sources de protéines a été réalisé. Puis, des modèles ont permis d'identifier les trajectoires de modifications de la consommation de sources de protéines qui permettaient d'augmenter l'adéquation nutritionnelle, sous différents scénarios d'acceptabilité et selon les profils de consommation identifiés. Les hypothèses d'acceptabilité mises en œuvre ont été évaluées et validées. Enfin, les impacts des modifications modélisées sur divers paramètres de durabilité ont été évalués, pour comparer le fait de viser une meilleure alimentation uniquement ou une meilleure alimentation allant également vers plus de végétal.

Au-delà des résultats de ces travaux déjà discutés dans les publications présentées dans les parties précédentes, l'objectif de cette partie était de discuter de façon transversale les méthodes et résultats de cette thèse, en développant cinq axes principaux : la transition diététique récente en lien avec l'adéquation nutritionnelle, la sensibilité des modèles à la prise en compte de la biodisponibilité des nutriments, l'importance du niveau d'agrégation des groupes alimentaires, l'acceptabilité théorique et pratique des modifications diététiques nutritionnellement favorables et la compatibilité des paramètres de durabilité en lien avec les recommandations nutritionnelles.

- **Les apports de cette thèse à la compréhension de la potentielle transition diététique actuelle**

L'introduction bibliographique a permis de montrer, à partir de différents indicateurs partiels, l'existence d'une transition diététique en cours, et allant vers la dernière phase décrite par le HLPE (qui « se caractérise par des changements de comportement qui commencent à inverser les tendances négatives induites par les transformations précédentes »). Les données de l'enquête INCA2 utilisées dans les travaux personnels n°1, 2, 4 et 6 datent de 2006-2007 et représentent donc la consommation des français au début de la crise économique (Dubuisson et al. 2010). Ainsi, on peut estimer que les profils de consommation protéique identifiés dans le travail personnel n°2 représentent seulement une image des profils de consommation datant d'une dizaine d'années. Or, à la fois les données de consommation par bilan (FranceAgriMer 2015) et les données issues des enquêtes du CREDOC (Tavoularis et Sauvage 2018)

montrent une accélération de la baisse de consommation de produits carnés à partir de 2007 (pour les bilans alimentaires) ou 2010 (pour les enquêtes du CREDOC). Cette baisse est imputée à la fois aux effets de la crise économique de 2007 et à la prise de conscience des impacts sur la santé et l'environnement de hauts niveaux de consommation de produits carnés. De même, les enquêtes du CREDOC ont permis d'identifier une évolution des profils de consommation alimentaire, avec une part croissante de la population déclarant limiter sa consommation de viande, surtout depuis 2015. Les profils de consommateurs identifiés sur les données de 2006-2007 ont donc sans doute évolué.

A partir des données de l'enquête présentée dans le travail personnel n°5 de 2018 et en utilisant la même méthode que pour le travail personnel n°2 nous avons également pu identifier des profils de consommateurs. Les profils de 2006-2007 et ceux de 2018 ne sont cependant pas directement comparables car les méthodes utilisées pour les recueils de consommation sont largement différentes : un carnet de consommation de 7 jours pour INCA2, et un fréquentiel partiel pour l'enquête de 2018. On peut tout de même remarquer que des profils sont communs aux deux études : les consommateurs de bœuf, de porc et de poulet. Le profil « consommateurs à emporter » identifié en 2018 semble englober les profils « consommateurs à emporter » et « consommateurs de plats préparés de viande » de 2006-2007. Les consommateurs « traditionnels » de 2006-2007 étaient caractérisés par la consommation de pain, produits laitiers et charcuterie, alors que ceux de 2018 consommaient surtout du pain et des produits laitiers. Enfin, et c'est là que semble être la principale différence, les consommateurs caractérisés par une forte consommation de poisson et céréales complètes dans les deux études avaient une forte consommation de yaourts mais pas de légumes, légumineuses, noix et graines en 2006-2007, à l'inverse de 2018. De plus, ce groupe ne regroupe que 6% de la population en 2006-2007 contre 9% en 2018. Nous pouvons donc faire l'hypothèse que, malgré certains profils de consommateurs qui n'ont pas évolué en 10 ans, une partie des consommateurs français se sont tournés vers une plus grande consommation de protéines végétales en 2018, comportement non identifié en 2006-2007 où aucun des profils n'était caractérisé par la consommation de légumineuses, noix ou graines. Cette interprétation ne reste qu'une hypothèse étant donné les différences de méthodes de recueil de données de consommation. Les évolutions identifiées semblent tout de même être, jusqu'à présent, à la marge et ne pas modifier les grandes structures alimentaires. L'approche visant à explorer cette transition diététique par des micro-modifications pas-à-pas, comme c'est le cas dans les travaux personnels n°4 et 6, semble donc adaptée à des perspectives de changements diététiques ne modifiant que peu les grandes structures alimentaires. On peut tout de même s'attendre à voir se développer dans les années à venir de nouveaux profils basés sur la consommation de substituts de viande, dont le marché se développe rapidement

depuis quelques années.

- **La question de l'adéquation nutritionnelle liée à l'évolution de la consommation de sources de protéines n'est pas une question de protéines**

Le débat actuel sur les transitions diététiques vers une moindre consommation de protéines animales porte, entre autres, sur la question de l'adéquation des apports en protéines dans des régimes végétalisés. Par exemple, Wyker et Davison ont demandé à un panel d'étudiants étatsuniens de citer les inconvénients de consommer un régime végétalisé dans l'année à venir et celui mis le plus souvent en avant était le manque de protéines (32% des hommes et des femmes) (Wyker et Davison 2010). Lea *et al.* ont identifié les barrières à la consommation d'un régime végétalisé en Australie et ont montré que 16% des individus pensent que ces régimes ne contiennent pas assez de protéines (12% des femmes et 19% des hommes). De même, Poquet *et al.* ont identifié, à partir d'entretiens chez des mères de famille françaises, que les protéines sont citées comme un constituant indispensable du corps et sont associées spontanément à la consommation de viande (et particulièrement de viande rouge), mais pas à la consommation d'aliments végétaux (Poquet *et al.* 2017).

La majorité des études évaluant la prévalence d'inadéquation des apports protéiques dans des populations à différents niveaux d'apports en protéines végétales montraient que les apports protéiques étaient élevés, même pour des populations aux régimes fortement végétalisés (Clarys *et al.* 2014; Rizzo *et al.* 2013). Seule l'étude de Sobiecki *et al.* sur la cohorte EPIC-Oxford a évalué une prévalence d'inadéquation élevée des apports protéiques dans certaines populations (de 10% chez les hommes végétariens et de 16% chez les hommes végétaliens) (Sobiecki *et al.* 2016). Cependant, l'estimation des prévalences d'inadéquation dans ces études se fait le plus souvent à partir des apports observés et non des apports usuels et les différences de digestibilité et de profil en acides aminés entre les protéines animales et végétales ne sont généralement pas prises en compte. Le travail personnel n°1, quant à lui, a pris en compte, dans un échantillon national représentatif, l'apport usuel en protéines dans l'échantillon et les différences de digestibilité et de profils en acides aminés des différentes sources de protéines. Il a permis de conclure que l'ensemble de la population française présentait des apports adéquats en protéines en 2006-2007, même pour les pourcentages de protéines végétales dans le régime les plus élevés. De même, la prospective présentée dans ce travail a montré que, même en remplaçant les protéines animales par des protéines végétales déjà consommées, les apports protéiques étaient adéquats jusqu'à 50% de protéines végétales en moyenne dans la population et jusqu'à des régimes quasi-végétaliens dans le cas d'une substitution des protéines animales consommées par un mélange de légumineuses, noix et graines. Or cela semble être le cas chez les végétariens et végétaliens

(Allès et al. 2017; Bradbury et al. 2017; Clarys et al. 2014). De même, les simulations du travail personnel n°6 montrent que, même en visant systématiquement une augmentation de la part de protéines végétales dans les régimes, les apports protéiques individuels restent adéquats. Dans les pays occidentaux, la question de l'adéquation des apports protéiques lors de transitions diététiques vers une moindre consommation de protéines animales ne semble donc pas se poser.

Cependant, les « protéines alimentaires » doivent se comprendre comme les aliments sources de protéines et non pas comme le macronutriment « protéine ». Ces aliments contiennent une diversité de nutriments (Mariotti 2019) et les évolutions de consommation de sources de protéines peuvent engendrer des évolutions de l'adéquation des apports de nombreux nutriments. En effet, l'origine alimentaire des protéines consommées et les apports nutritionnels sont fortement corrélés. Par exemple, en Australie, la consommation de protéines animales était corrélée positivement à l'apport en AGS et négativement à l'apport en protéines végétales, fibres et vitamine E (Shang et al. 2017). De plus, les études évaluant l'adéquation nutritionnelle des régimes plus ou moins végétalisés ont montré que les individus suivant des régimes végétariens étaient plus nombreux à avoir des apports inadéquats en fer, zinc, calcium, vitamine B12 ou EPA+DHA, malgré des apports plus adéquats en fibres, folates, ou AGS par rapport aux omnivores (Allès et al. 2017; Rizzo et al. 2013; Sobiecki et al. 2016). Le travail personnel n°6 a permis d'identifier que les trajectoires d'amélioration de l'adéquation nutritionnelle globale modifiaient différemment l'adéquation nutritionnelle selon que l'on visait également ou non à systématiquement augmenter la proportion de protéines végétales dans l'alimentation. En effet, d'une part, le scénario visant uniquement une augmentation de l'adéquation nutritionnelle globale n'amenait pas à une augmentation de la proportion de protéines végétales dans les régimes. D'autre part, la probabilité d'adéquation moyenne en zinc n'augmentait que dans le scénario sans contrainte sur la proportion de protéines végétales dans les régimes. De même, les probabilités d'adéquation moyennes en EPA+DHA, fer, iode, potassium, riboflavine, vitamines B5, B6 et B12 augmentaient dans les deux scénarios, mais de façon plus marquée en absence de contrainte sur l'augmentation de la part de protéines végétales dans les régimes. Inversement, les probabilités d'adéquation moyennes en fibres et en folates étaient augmentées de manière plus importante dans le cas d'une augmentation systématique de la part de protéines végétales dans les régimes. Ainsi les modifications *a priori* acceptables les plus favorables à une meilleure adéquation nutritionnelle ne vont pas prioritairement dans le sens d'une plus grande part de protéines végétales dans les régimes. De plus, le fait de forcer les modifications vers plus de protéines végétales conduit à des points d'achoppement concernant certains nutriments dont l'adéquation nutritionnelle ne semble pas pouvoir augmenter (particulièrement le zinc).

Enfin, la question de l'évolution de la consommation de « protéines » ne peut pas s'envisager sans le contexte alimentaire dans lequel ces nutriments et/ou aliments sont consommés et cette question est donc indissociable des profils de consommation de sources de protéines. En effet, le travail personnel n°1 a permis d'identifier que la transition diététique vers une plus grande part de protéines végétales n'était pas associée aux mêmes niveaux d'inadéquation en protéines en fonction des aliments végétaux qui remplacent les aliments d'origine animale. Le travail personnel n°2 a permis d'identifier, au sein de la population INCA2 qui est presque exclusivement omnivore, différents profils de consommateurs de sources de protéines, caractérisés par la consommation d'un ou de quelques groupes d'aliments sources de protéines (le plus souvent animales). Ces profils sont associés à des niveaux d'adéquation nutritionnelle globale différents et à des probabilités d'adéquation différentes pour certains nutriments d'intérêt. Ces profils étant également associés à des répertoires alimentaires différents et des caractéristiques sociodémographiques différentes, la transition diététique vers une moindre consommation de protéines animales ne peut pas s'envisager de la même manière selon les profils. De même, le travail personnel n°3 a permis d'identifier que les profils de consommation associés à différents niveaux de consommation de protéines végétales en France étaient également associés à des attitudes vis-à-vis des différentes sources de protéines, une auto-efficacité et des normes sociales différentes en fonction des profils. Ainsi, comme démontré dans le travail personnel n°4, les trajectoires d'amélioration de l'adéquation nutritionnelle diffèrent, selon les profils, en termes de leviers diététiques (la consommation de quels aliments peut être augmentée de façon *a priori* acceptable ?) et nutritionnels (quels nutriments sont facilement augmentés et quels nutriments sont des points d'achoppement ?).

Les problématiques liées à la transition diététique vers plus de protéines végétales sont donc associées à certains nutriments dont les apports ne sont pas adéquats dans les régimes observés et dont l'adéquation ne s'améliore que peu ou pas en visant plus de protéines végétales et aux profils de consommation existants. Cela nécessite donc d'identifier, pour chaque profil, la meilleure trajectoire en termes de modifications diététiques acceptables pour améliorer l'adéquation nutritionnelle.

- **La biodisponibilité des nutriments dans la modélisation de modifications diététiques**

Une grande quantité d'études a évalué l'adéquation nutritionnelle de régimes ou a modélisé des régimes sous contrainte d'apports adéquats nutritionnellement. C'est le cas par exemple des travaux de l'Anses visant à élaborer des repères de consommation alimentaire permettant des régimes nutritionnellement adéquats. Ces travaux n'ont pas pris en compte la variation de la biodisponibilité du fer et du zinc selon la composition des régimes, du fait du manque de

données sur les teneurs en phytates et en fer héminique des aliments (Anses 2016c). Pour obtenir un régime tenant compte des habitudes de consommation et satisfaisant le besoin en fer chez toutes les femmes, il a été nécessaire de proposer des quantités de viande rouge maximales par rapport aux limites épidémiologiques fixées et d'augmenter les bornes de consommation (représentant la prise en compte de l'acceptabilité) de certains sous-groupes d'aliments riches en fer ou fortement contributeurs en fer comme le pain complet, les poissons, les légumineuses, les fruits à coques et les fruits secs. Or, cette approche ne prend pas en compte des variations de disponibilité en fer provenant de changements des proportions de fer héminique et non héminique et les résultats auraient sans doute été différents avec cette prise en compte. En effet, la quantité de viande rouge dans le régime obtenu était supérieure à celle du régime observé, et donc la biodisponibilité du fer présent dans le régime obtenu était vraisemblablement supérieure à celle du fer présent dans le régime observé, du fait d'une plus grande teneur en fer héminique. La biodisponibilité du fer entrant en compte dans le calcul du besoin nutritionnel et de la référence populationnelle associée, l'utilisation de cette référence dans un contexte alimentaire différent peut conduire à des biais importants. De même, Willett *et al.* ont identifié, avec la participation de scientifiques de divers pays et diverses spécialités, un régime planétaire qui permettrait, s'il était mis en place, de limiter les impacts de la production alimentaire sur le changement climatique (Willett et al. 2019). Ils ont modélisé un régime nutritionnellement adéquat, mais n'ont pas pris en compte la biodisponibilité du fer et du zinc. Or, le régime présenté contenant une grande quantité de céréales complètes et de légumineuses, la quantité de phytates (qui réduisent la biodisponibilité du fer et du zinc) est vraisemblablement élevée. Les quantités de fer et de zinc totaux des régimes sont au niveau des recommandations correspondant aux niveaux de fer héminique et de phytates présents dans les régimes occidentaux, ce qui n'est pas le cas du régime présenté. On peut donc se poser la question de l'adéquation des apports en fer et en zinc de ce régime. Les auteurs recommandent tout de même une supplémentation en fer (moins chère et à moindre risque que la viande rouge) pour les adolescentes, plus à risque d'anémie que la population générale. La majorité des études émettent des recommandations sur des régimes à adopter en fonction de différents critères de durabilité, mais n'évaluent pas correctement l'adéquation nutritionnelle de ces régimes et les conclusions sur les régimes nutritionnellement adéquats identifiés peuvent être ainsi erronées. Cependant il convient de préciser qu'il existe des incertitudes sur l'établissement des besoins nutritionnels, notamment en fer. En effet, le principal déterminant de la biodisponibilité du fer non-héminique est le taux de ferritine sérique (Armah et al. 2013), impliquant un rétrocontrôle (plus les stocks de fer sont faibles, plus le fer est absorbé). Ainsi, il est compliqué de conclure sur l'adéquation des apports en fer à partir de données de consommation uniquement, étant données la variabilité interindividuelle des besoins.

Les rares études ayant évalué l'impact de l'ensemble des facteurs pouvant moduler la biodisponibilité du fer et du zinc ont montré des différences importantes dans l'estimation des prévalences d'inadéquation ou la composition des régimes optimaux selon que cette biodisponibilité était prise en compte ou non. En effet, Perignon *et al.* ont évalué la prévalence d'inadéquation des apports en fer en France en prenant en compte ou non la biodisponibilité du fer (selon la nature héminique ou non du fer et selon les apports en nutriments modulant la biodisponibilité du fer non-héminique) (Perignon *et al.* 2018). Ils ont évalué que la prévalence d'inadéquation était largement sous-évaluée chez les femmes lorsque la biodisponibilité du fer n'était pas prise en compte (18,8% contre 31,6%). De même, Barré *et al.* ont modélisé différents régimes optimisant l'adéquation nutritionnelle ainsi que d'autres paramètres de durabilité, selon que la biodisponibilité des nutriments était prise en compte en non (Barré *et al.* 2018). Ils ont montré qu'optimiser des régimes sans prendre en compte la biodisponibilité du fer amenait à des régimes adéquats en fer « absorbé » pour seulement 46% des femmes. Prendre en compte la biodisponibilité du fer changeait la composition des régimes optimisés : les femmes avaient des régimes contenant 358% de charcuterie en plus (surtout du boudin noir) et les hommes avaient des régimes contenant 20% de viande rouge en plus que sans prise en compte de la biodisponibilité. Les simulations des travaux personnels n°4 et 6 étaient basées sur la maximisation du score PANDiet, qui prend en compte la biodisponibilité du fer, du zinc et les différences de digestibilité entre protéines animales et végétales. Dans ces simulations, contrairement aux régimes nutritionnellement adéquats simulés dans d'autres études, l'amélioration de l'adéquation nutritionnelle était conditionnée à une augmentation (dans le cas où la seule contrainte était d'augmenter le PANDiet) ou une stagnation (dans le cas d'une contrainte d'augmenter la part de protéines végétales) de la consommation de viande rouge maigre chez les femmes.

Les modèles optimisant ou maximisant l'adéquation nutritionnelle des régimes semblent donc être sensibles à la prise en compte de la biodisponibilité des nutriments, particulièrement le fer chez les femmes. Il semble donc essentiel de prendre en compte ces facteurs lors des modélisations futures, d'autant plus que des formules permettent de calculer simplement la biodisponibilité du fer et du zinc à l'échelle d'un régime (Armah *et al.* 2013; Miller *et al.* 2007).

- **Les niveaux d'agrégation des groupes alimentaires dans les modèles et la présentation des résultats**

Les études modélisant des régimes adéquats, notamment par optimisation linéaire, utilisent les aliments à différents niveaux d'agrégation : les items alimentaires, les sous-groupes alimentaires ou les groupes alimentaires. Le processus d'optimisation identifie donc les quantités d'aliments permettant des apports nutritionnels adéquats. L'Anses a choisi de

réaliser cette optimisation à l'échelle du sous-groupe alimentaire, car optimiser à l'échelle de l'item alimentaire amenait à un petit nombre d'aliments proposé dans chaque catégorie et à des quantités proposées qui ne permettaient pas une interprétation en termes d'usage (Anses 2016c). Ce choix d'un niveau intermédiaire d'agrégation limite l'interprétation des résultats. Ainsi par exemple les résultats de l'optimisation réalisée par l'Anses sont exprimés en termes de « viande hors volaille », et ne permettent pas d'identifier les quantités de viandes bovine ou porcine, ni les quantités de viande maigre ou viande grasse optimisant les critères nutritionnels. De même, les études choisissant d'identifier les quantités d'items alimentaires optimisant l'adéquation nutritionnelle présentent, dans la plupart des cas, les variations de quantités d'aliments simulées en termes de variations de sous-groupes ou groupes alimentaires (Barré et al. 2018; Perignon et al. 2016; Vieux et al. 2018). Dans ces études, les conclusions en termes d'évolution de consommation de viande rouge portent sur le groupe « viande de ruminants », sans information sur les variations au sein de ce groupe. Or les compositions nutritionnelles de 100 grammes de steak haché à 15% de matières grasses (7,1 g d'AGS) et celle de 100 grammes de bifteck grillé (0,9 g d'AGS) sont très différentes (Anses 2016d) et la recommandation de consommer plus ou moins de « viande de ruminants » ou de « viande hors volaille » n'a pas de sens sans préciser les morceaux concernés.

Dans les travaux personnels n°4 et 6, les modifications de consommation ont été réalisées à l'échelle de l'item alimentaire. Pour présenter les résultats, étant donné les évolutions très différentes des items alimentaires du groupe « viande hors volaille », un choix a été fait de séparer chaque groupe de viande en « viande maigre » et « viande grasse », avec une limite à 35% de l'énergie apportée par les lipides. Dans tous les scénarios et pour les deux sexes, l'amélioration de l'adéquation nutritionnelle était conditionnée à une diminution de la consommation de viande grasse (hors volaille), de volaille grasse et de charcuterie. En revanche, dans le scénario visant uniquement une meilleure adéquation nutritionnelle, la viande de volaille maigre augmentait pour les deux sexes et la viande hors volaille maigre augmentait pour les femmes. Ainsi, par exemple, la quantité de viande hors volaille consommée par les femmes ne variait pas dans le scénario visant uniquement une meilleure adéquation nutritionnelle, la quantité de viande maigre supplémentaire compensant la quantité de viande grasse en moins.

Les effets de régimes riches en viande de bœuf maigre ont été testés et comparés à des régimes plus riches en protéines végétales lors d'études d'intervention. Un régime ayant 53% des protéines apportées par de la viande de bœuf maigre, 23% par les produits laitiers, 11% par d'autres viandes et 13% par les protéines végétales, appelé le régime BOLD (Beef in an Optimal Lean Diet), était comparé à un régime ayant la même composition en macronutriments,

mais pas la même origine des protéines (9% de bœuf maigre, 31% de produits laitiers, 40% d'autres viandes et 20% de protéines végétales), appelé le régime DASH (Dietary Approaches to Stop Hypertension) modifié. Les deux régimes avaient des effets bénéfiques du même ordre sur le cholestérol total, LDL et non-HDL, la pression artérielle systolique et seul le régime BOLD diminuait la rigidité artérielle, comparé à un régime témoin riche en viande grasse (Richter et al. 2015). Ces résultats sembleraient indiquer que les bénéfices cardiovasculaires de régimes riches en protéines végétales seraient dus aux macronutriments impliqués (AGS, cholestérol, fibres) et non à l'origine animale ou végétale des protéines. Les résultats sont à prendre avec précaution étant donné l'échantillon peu important ($n = 36$) et les régimes non directement comparables, mais semblent démontrer l'intérêt de séparer les différentes viandes du groupe « viande » et de considérer la viande de bœuf maigre différemment de la viande de bœuf grasse.

Ainsi, au-delà des limites épidémiologiques de consommation de viande rouge liées au risque de cancer colorectal et de maladies cardiovasculaires (Anses 2016b), les recommandations de limiter la viande rouge pour des critères nutritionnels doivent préciser le type de morceaux concernés. C'est d'ailleurs le cas des recommandations étatsuniennes, dont un des points clés est de consommer « *une variété de sources de protéines, y compris les produits de la mer, les viandes et volailles maigres, les œufs, les légumineuses, les noix, graines et produits à base de soja* » (U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture 2015), alors que les dernières recommandations du PNNS sont de « *privilégier la volaille et limiter les autres viandes (porc, bœuf, veau, mouton, agneau, abats)* à 500 g par semaine », avec comme données complémentaires « *500 g de viande hors volaille par semaine, cela correspond à environ 3 ou 4 steaks* » et « *Pour le plaisir du goût et de la variété, vous pouvez alterner dans la semaine la viande, la volaille, le poisson, les œufs, les légumes secs* » (Santé Publique France 2019). L'évaluation a posteriori de la compréhension et de l'impact de ce type de recommandations sur le consommateur semble nécessaire.

- **L'acceptabilité dans les modélisations, un écueil à l'importance primordiale**

Pendant longtemps, les études visant à identifier des régimes nutritionnellement adéquats ne prenaient pas en compte l'acceptabilité culturelle des modifications simulées. Les études récentes cherchent à prendre en compte l'acceptabilité culturelle en imposant des limites minimales et maximales de consommation d'aliments et groupes alimentaires et en minimisant l'écart entre les régimes observés et les régimes modélisés, au niveau du régime moyen d'une population (Anses 2016c; Barré et al. 2018) ou au niveau individuel (Maillot et al. 2009). Les études développant une approche plus fine pour prendre en compte l'acceptabilité culturelle priorisaient les types de changement opérés dans les régimes comme suit : la modification de

tailles de portion, puis l'introduction de nouveaux aliments (en priorité ceux largement consommés) et enfin la suppression d'aliments des répertoires individuels (Horgan et al. 2016; Maillot et al. 2009). Cependant, les quatre dernières revues de la littérature concernant la modélisation de régimes nutritionnellement adéquats et/ou durables ont conclu en recommandant une meilleure prise en compte de l'acceptabilité culturelle lors de modélisations diététiques. En effet, Perignon et al. ont conclu que *« plus de recherche sur les modifications diététiques que les consommateurs seraient disposés à envisager et sur les méthodologies ou indicateurs qui permettraient une meilleure évaluation de l'acceptabilité aiderait à identifier des régimes alternatifs plus réalistes »* (Perignon et al. 2017). Gazan et al. ont conclu que *« dans toutes les études publiées, l'acceptabilité culturelle demeure difficile à évaluer parce qu'il n'existe toujours pas de critères objectifs pour déterminer ce qui est acceptable »* (Gazan et al. 2018). van Dooren ajoute que *« des progrès supplémentaires sont nécessaires pour mettre en œuvre les contraintes d'acceptabilité »* (van Dooren 2018) et Doro et Réquillart que *« la principale limite de cette catégorie de modèles réside dans le fait que les préférences des consommateurs ne sont pas correctement prises en compte »* (Doro et Réquillart 2018).

Les travaux personnels n°4 et 6 se sont basés sur les hypothèses évoquées précédemment, et sur les modèles développés par Verger et al. (Verger et al. 2014) et Bianchi et al. (Bianchi et al. 2018a), en apportant quelques nouveautés pour prendre en compte de manière plus précise l'acceptabilité culturelle. En premier lieu, les modèles présentés dans ces travaux consistaient uniquement en une modification de la consommation d'aliments sources de protéines. L'hypothèse sous-jacente était qu'étant donné la tendance à une évolution rapide de la consommation de sources de protéines depuis quelques années dans les pays occidentaux, comme évoqué précédemment, les recommandations concernant les aliments sources de protéines étaient plus acceptables que celles concernant d'autres groupes alimentaires. Par exemple, la consommation de viande tend à aller dans le sens des recommandations, en diminuant dans les dernières années (Tavoularis et Sauvage 2018), au contraire de la consommation de fruits et légumes, qui ne va pas dans le sens des recommandations en diminuant dans les dernières années (Tavoularis et Hébel 2017). Ensuite, le premier scénario du travail personnel n°4 (S1), supposé le plus acceptable, consiste uniquement à modifier les tailles de portions. Le deuxième scénario (S2), repris dans le travail personnel n°6, suppose qu'introduire des aliments non-consommés est moins acceptable que modifier uniquement des tailles de portion, mais tout de même acceptable si l'aliment introduit est déjà largement consommé par des individus au profil de consommation similaire. Ce scénario va donc plus loin que les hypothèses de Maillot et al. ou Tyszler et al. qui privilégiaient l'introduction ou l'augmentation de tailles de portion des aliments les plus consommés dans l'ensemble de la population (Tyszler et al. 2016). En effet, cette approche ignore que différents

profils de consommation existent au sein d'une population et que ces profils sont caractérisés par des répertoires alimentaires disjoints et des profils nutritionnels différents, comme développé dans le travail personnel n°2. Enfin, l'approche « pas-à-pas » mise en place dans cette thèse permet d'identifier les premières étapes d'une transition vers une meilleure alimentation, en limitant le nombre de micro-modifications (correspondant à un pas de portion, soit en moyenne 1/5 de la portion maximale) à 20. Ainsi, en plus de limiter les modifications aux répertoires alimentaires individuels ou des profils de consommateurs, l'approche visait à limiter le nombre de modifications, pour assurer, en plus d'une faible déviation quantitative par rapport au profil initial, un faible nombre de modifications. Les régimes finaux identifiés ne sont donc pas optimaux, contrairement à la majorité des études, mais permettent d'identifier les trajectoires à emprunter qui vont dans le sens d'une amélioration de la qualité nutritionnelle de l'alimentation.

Un apport important de cette thèse à la compréhension de l'acceptabilité des recommandations diététiques a été de tester les hypothèses mises en place dans les travaux personnels n°4 et n°6. En effet, à part Bianchi *et al.* qui ont validé le fait que modifier des tailles de portion était plus acceptable que substituer des aliments d'un même sous-groupe, ce qui était plus acceptable que substituer des aliments de sous-groupes différents, aucune étude n'a testé les hypothèses mises en place dans les modélisations (Bianchi *et al.* 2018a). Dans le travail personnel n°5, une enquête a été réalisée pour tester l'acceptabilité des différentes recommandations issues du travail personnel n°4 sur une population représentative de la population française en 2018. Un des résultats de cette étude était que diminuer les tailles de portion était plus acceptable qu'introduire de nouveaux aliments, qui était plus acceptable qu'augmenter les tailles de portion, ce qui est en contradiction avec les hypothèses mises en place dans les quelques études ayant pris en compte l'acceptabilité de manière élaborée (Horgan *et al.* 2016; Maillot *et al.* 2009). De plus, l'hypothèse de cette étude était que les recommandations portant sur des aliments spécifiques étaient plus ou moins acceptables en fonction des profils de consommation identifiés. L'étude a également permis de valider une hypothèse majeure mise en place dans les modèles de cette thèse, en lien avec les techniques de filtrage collaboratif : introduire un aliment non consommé dans son alimentation est plus acceptable lorsque cet aliment est largement consommé par les individus au profil de consommation protéique similaire. En effet, si on considère un cluster de consommateurs au profil de consommation protéique similaire, chaque tranche de 10% de consommateurs supplémentaire d'un aliment dans ce profil augmente la probabilité qu'un individu non-consommateur soit enclin à consommer cet aliment de 25%. Par exemple, un individu A appartenant à un cluster où 50% des individus consomment un aliment aura 25% de plus de chance d'être enclin à introduire cet aliment dans son répertoire alimentaire qu'un individu B

appartenant à un cluster où 40% des individus consomment cet aliment, A et B étant non-consommateurs de cet aliment. De même, cette étude a montré que la fréquence de consommation d'un aliment était associée à l'acceptabilité de modifier les tailles de portion des aliments consommés : plus un aliment est consommé fréquemment par un individu, plus il est enclin à en consommer une portion plus large et moins il est enclin à en consommer une portion moins large. En plus de cela, l'étude a permis d'identifier que le profil de consommation en lui-même, l'aliment considéré, ou les caractéristiques sociodémographiques étaient associés à l'acceptabilité de recommandations diététiques. Ces résultats n'ont cependant pas été pris en compte dans les modèles des travaux personnels n°4 et 6.

Les résultats des différents travaux de cette thèse permettent donc de poser le cadre théorique d'une échelle intermédiaire entre recommandations nationales génériques, qui sont bien connues mais peu suivies (Escalon et al. 2009; Tavoularis et Hébel 2017) et la nutrition personnalisée, qui n'est pas accessible à l'ensemble de la population : les recommandations spécifiques à des profils de consommation particuliers. L'application pratique et en termes de santé publique de cette échelle intermédiaire reste à développer, car il faudrait pouvoir, dans un premier temps, cibler les profils de consommation, pour pouvoir émettre les recommandations spécifiques à chaque profil. Santé Publique France a eu une approche allant partiellement dans ce sens lors de l'élaboration des recommandations alimentaires du PNNS. En effet, ayant identifié que les recommandations étaient plus ou moins bien comprises et acceptées en fonction des caractéristiques sociodémographiques (et donc intrinsèquement du profil de consommation alimentaire), Santé Publique France a réalisé une étude visant à évaluer la mise en place de conseils à deux niveaux : des recommandations simplifiées et des recommandations détaillées, soit en donnant un exemple, soit en justifiant la recommandation avec des critères nutritionnels, gustatifs ou pratiques (Santé Publique France 2019). Ils ont ainsi identifié que les recommandations étaient mieux acceptées pour les catégories socioprofessionnelles les moins aisées lorsqu'elles étaient justifiées ou détaillées, ce qui peut s'expliquer par la méconnaissance de certains aliments, due à l'absence de ces aliments des répertoires alimentaires de certains profils, moins aisés, comme développé dans le travail personnel n°2.

- **Une meilleure adéquation nutritionnelle ou plus de protéines végétales ? Quels paramètres de durabilité étudier ?**

En dernier lieu, il semblait important de discuter les résultats de cette thèse dans une perspective de durabilité de l'alimentation et de discuter des différents indicateurs utilisés. Un premier résultat important à discuter est la différence entre sécurité nutritionnelle et estimation des morts prématurées évitées. En effet, dans le travail personnel n°6, le scénario visant à

maximiser uniquement l'adéquation nutritionnelle amène à un PANDiet légèrement plus élevé que le scénario visant également à augmenter le pourcentage de protéines végétales, mais à un moindre nombre de morts prématurées estimé par le modèle PRIME. Le score PANDiet inférieur s'explique tout d'abord par construction : en ajoutant une contrainte, on limite le nombre de possibilités et donc la maximisation du PANDiet. D'autre part, les paramètres d'entrée des deux indicateurs diffèrent : le PANDiet inclut l'ensemble des nutriments pour lesquels des références nutritionnelles ont été établies, tandis que le PRIME n'inclut que les nutriments et aliments pour lesquels des associations avec des maladies chroniques ont été établies à partir de méta-analyses d'études épidémiologiques. Deux paramètres inclus dans le modèle PRIME sont tout de même à discuter, avec, tout d'abord, le cholestérol alimentaire, pour lequel aucune référence nutritionnelle n'a été établie dans les derniers rapports scientifiques. Par exemple, l'EFSA a choisi de ne pas proposer de référence nutritionnelle sur le cholestérol, étant donné que le déterminant principal du cholestérol LDL sanguin est l'apport en AGS et que le cholestérol alimentaire provient de sources qui sont aussi des sources d'AGS (produits laitiers et viande) (EFSA Panel on Dietetic Products 2010). Le même argument est repris dans les recommandations étatsuniennes pour justifier l'absence de recommandation nutritionnelle (U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture 2015). Puis, le modèle PRIME prend en compte comme paramètre d'entrée les acides gras polyinsaturés totaux et non les différents acides gras LA, ALA, EPA et DHA, comme dans les références nutritionnelles (Anses 2011a; EFSA Panel on Dietetic Products 2010). Ainsi, l'augmentation des apports en EPA et DHA dans les différents scénarios n'est pas prise en compte par le modèle PRIME, car cette augmentation est négligeable en masse par rapport aux variations de LA ou ALA.

Au-delà de ces éléments discutables dans les paramètres d'entrée des indicateurs, la question amenée par ce résultat est celle de l'objectif à viser lorsqu'on met en place des repères alimentaires : faut-il viser des apports nutritionnels adéquats pour l'ensemble des nutriments ou hiérarchiser les nutriments (ou aliments) en lien avec des maladies chroniques ? Le PANDiet étant un indicateur de sécurité nutritionnelle globale, les probabilités d'adéquation de l'ensemble des nutriments ont le même poids au sein de chaque sous-score. Or, certaines références nutritionnelles sont des *Apports Satisfaisants* qui ont été établis par défaut à la moyenne ou la médiane de la population en considérant qu'il n'y avait pas d'indication de déficience dans cette population (vitamine B5, vitamine E, manganèse) (Anses 2016a). Ainsi, un individu ayant des apports en ces nutriments inférieur à la moyenne aura une probabilité d'adéquation inférieure à 100%. Même pour des nutriments d'intérêt ayant des prévalences d'inadéquation élevées et des symptômes liés à une déficience identifiés, comme le fer, la question de mettre en priorité l'augmentation des apports en fer vis-à-vis des apports en

nutriments liés à des maladies chroniques se pose. En effet, les femmes ayant les probabilités d'adéquation en fer les plus faibles dans les pays occidentaux ont tout de même des apports importants, elles peuvent être diagnostiquées relativement facilement et une supplémentation en fer est possible sans difficulté. L'Anses a ainsi choisi, dans l'élaboration de ses repères de consommation, un régime ne permettant pas des apports en fer adéquats pour 100% des femmes, recommandant « une surveillance du statut martial » pour les femmes susceptibles d'avoir un besoin en fer élevé (Anses 2016c). On peut donc discuter de la pertinence de placer ces nutriments au même niveau que d'autres, comme les fibres ou les acides gras $\omega 3$ qui ont des effets épidémiologiques démontrés sur des maladies chroniques. Par exemple, les fibres sont associées à des effets protecteur vis-à-vis des maladies cardiovasculaires, du diabète de type 2, des cancers colorectaux et du sein (Anses 2016a), et les acides gras $\omega 3$ à longue chaîne sont associés à des effets protecteurs vis-à-vis des maladies cardiovasculaires (Anses 2011a). Dans l'optique d'identifier les modifications à mettre en place prioritairement pour améliorer la qualité de l'alimentation d'une population, il semblerait donc plus efficace, d'un point de vue de santé publique, de recommander des apports adéquats en nutriments identifiés comme associés à des maladies chroniques (par exemple AGS, sel, sucre, fibres, ou DHA).

Pour établir les dernières recommandations du PNNS, Santé Publique France a d'ailleurs choisi de mêler les deux approches : les recommandations alimentaires sont issues des travaux de l'Anses visant à définir un régime nutritionnellement adéquat et proche des régimes observés et Santé Publique France recommande également d'éviter les aliments ayant un Nutri-Score « D » et « E ». Or, le Nutri-Score est basé sur les apports en fibres, protéines, fruits, légumes, énergie, AGS, sucres et sel, soit les nutriments et aliments ayant une incidence directe sur les maladies chroniques. Une étude récente a d'ailleurs confirmé que la consommation d'aliments ayant un mauvais Nutri-Score était associée au risque de cancers (particulièrement du colon-rectum, tractus aérodigestif supérieur et estomac, poumon pour les hommes, foie et sein post-ménopausique pour les femmes) (Deschasaux et al. 2018). Il convient tout de même de souligner le fait que les protéines totales sont incluses dans le calcul du Nutri-Score, alors que, comme discuté dans l'introduction bibliographique et la discussion, la quantité de protéines totales consommée n'est pas associée de manière cohérente à des événements de santé et les associations ayant les niveaux de preuves les plus élevées sont liées à l'origine animale ou végétale des protéines, voire aux groupes aliments protéiques (Mariotti 2019).

L'autre volet de la discussion sur les indicateurs de durabilité concerne l'équilibre entre indicateurs liés à la santé (adéquation nutritionnelle ou morts prématurées évitées) et les

autres indicateurs de durabilité : notamment le prix et les impacts environnementaux. En effet, même si la majeure partie de cette thèse concernait des thématiques de nutrition et d'acceptabilité sociale, il a semblé essentiel, comme développé dans l'introduction bibliographique, d'évaluer les impacts des trajectoires identifiées sur différents paramètres de durabilité. Ainsi, dans le travail personnel n°6, viser uniquement une meilleure adéquation nutritionnelle amenait à des prix des régimes plus élevés et des émissions de GES plus élevées que dans la situation observée, quand les régimes modélisés en visant une meilleure adéquation nutritionnelle et une part plus élevée de protéines végétales amenaient à réduire les émissions de GES et modifiaient peu le coût des régimes, par rapport aux régimes observés. De même, le travail personnel n°6bis nous a permis d'identifier que les modifications simulées uniquement sous contrainte d'une meilleure adéquation nutritionnelle n'étaient pas réalistes si elles devaient être compensées par la production française d'ici 2027, ni en termes de production animale ou végétale, ni en termes de surfaces de terres disponibles. En revanche, les modifications diététiques liées à la double contrainte d'améliorer l'adéquation nutritionnelle tout en augmentant le pourcentage de protéines végétales semblaient réalisables et pouvaient être compensées par la production agricole française. Ces résultats sont en accord avec d'autres études montrant que les différents paramètres de durabilité ne sont pas toujours compatibles, comme développé dans l'introduction bibliographique. Ainsi, dans l'objectif global de réduire les émissions de GES dont l'alimentation est un contributeur majeur, les recommandations alimentaires devraient prendre en compte les impacts environnementaux, comme recommandé par des publications récentes (Godfray et al. 2018; Willett et al. 2019). Une étude récente a d'ailleurs démontré l'efficacité de l'étiquetage nutritionnel et environnemental (basé sur des feux tricolores en fonction de l'apport calorique et des émissions de GES des produits) sur les achats de produits ayant une meilleure durabilité (Osman et Thornton 2019). Ainsi, après comparaison des impacts sur les différents paramètres de durabilité des deux scénarios du travail personnel n°6, il semble que la moindre adéquation nutritionnelle globale des régimes (particulièrement en fer et en zinc) soit le seul point « négatif » du scénario visant systématiquement plus de protéines végétales. En effet, la mise en place des régimes de ce scénario amènerait à plus de morts prématurées évitées, moins d'émissions de GES, une moindre utilisation des terres et un moindre coût que l'autre scénario. On pourrait donc conclure que la tendance de ces dernières années à augmenter son apport en protéines végétales serait finalement bénéfique pour la santé, l'environnement, à moindre coût et de façon acceptable, en recommandant tout de même une vigilance vis-à-vis des déficiences éventuelles en fer et zinc et un point d'achoppement au niveau de la production de légumineuses en France, qui reste faible au regard de la consommation actuelle et future.

2. Conclusion

Le travail de cette thèse a porté sur la modélisation de trajectoires acceptables de réarrangements de la consommation d'aliments sources de protéines visant à augmenter l'adéquation nutritionnelle des régimes et les impacts de ces modifications sur la durabilité des régimes.

Dans un premier temps, un état des lieux des profils de consommation de sources de protéines a été réalisé. Cela nous a permis d'évaluer que les apports en protéines et en acides aminés sont adéquats dans la population française, même pour les individus ayant une forte consommation de protéines végétales. Divers profils de consommation de sources de protéines existent au sein de la population française, majoritairement omnivore. Ces profils sont associés à la consommation d'un ou quelques aliments protéiques, le plus souvent animaux. Ils diffèrent par les profils nutritionnels et les caractéristiques sociodémographiques associés. Des profils d'individus réduisant leur consommation de viande sans aller jusqu'au végétarisme émergent récemment et sont associés aux attitudes en lien avec la santé, l'environnement et le bien-être animal, les normes sociales et l'auto-efficacité des individus. Les profils émergents sont caractérisés par une moindre consommation de viande rouge et une consommation plus élevée de légumes, légumineuses, noix et graines, par rapport à la population omnivore majoritaire.

Dans un second temps, les trajectoires de modification de la consommation d'aliments protéiques améliorant le plus l'adéquation nutritionnelle ont été identifiées. Pour prendre en compte l'acceptabilité culturelle, les modifications envisagées consistaient à augmenter ou diminuer les tailles de portion des aliments protéiques consommés par un individu ou à introduire des petites portions d'aliments non consommés par l'individu, mais largement consommés par des individus au profil de consommation protéique similaire à celui de l'individu. L'hypothèse selon laquelle l'introduction de ces aliments est acceptable a été validée à l'aide d'une enquête sur une population représentative. Les modifications les plus efficaces pour augmenter l'adéquation nutritionnelle étaient des portions plus faibles de charcuterie, sandwiches et fromage et des portions plus importantes de poisson gras, volaille maigre et légumineuses, pour toute la population. Cependant, certaines modifications étaient efficaces pour augmenter l'adéquation nutritionnelle uniquement pour certains profils de consommation protéique, étant donné les différences de répertoires alimentaires et les profils nutritionnels spécifiques auxquels ils sont associés.

En dernier lieu, la comparaison entre scénario visant uniquement à augmenter l'adéquation nutritionnelle et scénario visant également à augmenter la part de protéines végétales dans les régimes a été effectuée. Ce dernier scénario, qui semble conforme à la tendance observée

dans les dernières années, amène à une adéquation nutritionnelle légèrement inférieure mais à un nombre supérieur de morts prématurée évitées, de moindres émissions de gaz à effet de serre, une moindre utilisation des terres et un moindre coût, par rapport au premier scénario. Les points d'achoppement liés à l'augmentation de la part de protéines végétales sont d'une part des risques de déficience en fer et en zinc, particulièrement pour les femmes, et d'autre part les filières agricoles françaises, particulièrement les filières de production de légumineuses, qui ne paraissent pas en mesure de produire les légumineuses nécessaires à la consommation simulée.

3. Perspectives

Les résultats présentés dans cette thèse amènent à différentes pistes pour la poursuite de ces travaux :

- *Les « règles » établies par l'enquête d'acceptabilité à intégrer dans les simulations de modifications diététiques*

L'enquête sur l'acceptabilité des modifications les plus favorables à l'adéquation nutritionnelle des régimes a permis d'identifier certaines « règles », au-delà de l'hypothèse selon laquelle introduire un nouvel aliment dans son alimentation est acceptable si on appartient à un cluster d'individus à forte proportion de consommateurs de cet aliment. En effet, l'enquête a permis de démontrer que les recommandations de consommer des portions plus petites étaient plus acceptables que celles d'introduire des nouveaux aliments, ce qui est plus acceptable que de consommer des portions plus larges. De plus, les individus consommant fréquemment un aliment étaient enclins à consommer de plus larges portions de cet aliment, mais pas de plus petites. De même, les caractéristiques sociodémographiques influençaient l'acceptabilité de consommer des portions plus larges, plus petites ou d'introduire de nouveaux aliments. Enfin, l'acceptabilité des modifications dépendait de l'aliment concerné. Ces différents éléments pourraient être intégrés à l'algorithme de modélisation pour simuler des modifications diététiques améliorant l'adéquation nutritionnelle tout en étant acceptables. De même, si des données concernant les attitudes ou normes sociales des individus vis-à-vis de la viande sont disponibles en plus des recueils alimentaires, il pourrait être possible d'introduire les résultats du travail personnel n°3 pour affiner la prise en compte de l'acceptabilité de recommandations, notamment concernant la consommation de viande.

- *Des approches d'intelligence artificielle pour aller plus loin dans l'identification de modifications acceptables*

Dans les dernières années, la recherche en intelligence artificielle s'est développée, en lien avec le développement de plateformes numériques traitant de plus en plus de données, et donc la recherche de systèmes de recommandation les plus performants possibles. Cette recherche est appliquée à différents domaines mais est encore peu développée dans le domaine du comportement alimentaire. Les données des enquêtes de consommation, ou même les données issues d'application pour smartphones largement utilisées et permettant l'accès à une grande quantité de recueils de consommation alimentaire pourraient ainsi être utilisées pour identifier des profils de consommation, leur évolution, les caractériser en fonction de leurs caractéristiques sociodémographiques et prédire leurs préférences alimentaires, pour pouvoir identifier et recommander, pour chaque individu, des choix alimentaires bénéfiques à

la santé et acceptables. Des travaux de ce type sont réalisés par Akkoyunlu *et al.* pour identifier, d'après des recueils alimentaires, des contextes de consommation, et donc des aliments facilement substituables entre eux. Ces travaux sont basés sur une mesure empirique de la substituabilité des aliments consommés, basée sur les données de consommation qui définissent un contexte alimentaire (Akkoyunlu *et al.* 2017).

- *La pondération des nutriments du PANDiet*

Actuellement, les différents nutriments ont le même poids dans le calcul de chaque sous-score du PANDiet. Comme développé dans la discussion, cela peut ne pas sembler pertinent étant donné qu'une modification augmentant de 10% la probabilité d'adéquation en manganèse est ainsi équivalente à une autre modification augmentant de 10% la probabilité d'adéquation en fibres. Ce biais est pris en compte partiellement par le fait que les nutriments du sous-score de modération (notamment les AGS, le sel et le sucre) ont plus de poids dans le PANDiet que les nutriments du sous-score d'adéquation. Or les AGS, le sel et le sucre sont parmi les nutriments ayant les effets les plus importants sur les maladies chroniques. Une manière d'améliorer le calcul de PANDiet serait de pondérer chaque nutriment par son effet sur la santé. Pour cela, une métrique commune à tous les nutriments pourrait être l'année de vie pondérée par l'incapacité (DALY). En effet, cette métrique prend à la fois en compte les morts prématurées engendrées (ou évitées) par l'apport d'un nutriment, mais également la qualité de vie détériorée (ou améliorée) par l'apport d'un nutriment. Cela permettrait de comparer, par exemple, les effets d'une augmentation de l'adéquation des apports en fibres (qui ont un effet protecteur sur la mortalité par maladies chroniques) par rapport aux effets de l'augmentation de l'adéquation des apports en fer (qui a un effet protecteur sur l'anémie). Cependant cette approche nécessiterait un développement méthodologique important, car les DALYs associés aux apports nutritionnels n'existent que partiellement et pour quelques nutriments, par exemple le sucre (Long *et al.* 2015). De plus, cette approche est généraliste et n'est pas valable sur des populations spécifiques comme les femmes enceintes ou les individus souffrant de certaines pathologies.

- *La prise en compte d'autres paramètres de durabilité*

Dans cette thèse, seuls la qualité de l'alimentation (à travers l'adéquation nutritionnelle, l'exposition aux contaminants et le nombre de morts prématurées évitées), le prix, l'acceptabilité, les émissions de GES et les surfaces agricoles ont été étudiés. Comme développé dans l'introduction bibliographique, l'alimentation a également un impact sur d'autres paramètres de durabilité, comme la consommation énergétique, l'eutrophisation ou l'acidification. D'une part, il aurait été pertinent d'utiliser différentes sources de données pour

évaluer les émissions de GES liées à la consommation alimentaire, par exemple en utilisant la base Carbone, développée par l'ADEME, pour vérifier la robustesse des résultats en termes d'émission de GES par rapport aux données utilisées actuellement (ADEME 2019), même si les émissions de GES estimées sont cohérentes avec les autres études du même type. D'autre part, il aurait été pertinent d'évaluer les impacts des modifications diététiques simulées sur les autres paramètres de durabilité évoqués, comme cela a été réalisé dans d'autres études sur la durabilité de l'alimentation (Barré et al. 2018; Seconda et al. 2018b).

- *Des recommandations alimentaires basées sur l'ensemble des paramètres de durabilité*

Comme évoqué dans la discussion, les recommandations alimentaires nationales sont le plus souvent basées sur l'optimisation de régimes nutritionnellement adéquats. L'Anses, dans l'élaboration des repères de consommation alimentaire récente, a choisi de prendre en compte deux paramètres de durabilité supplémentaires : l'acceptabilité culturelle et l'exposition aux contaminants (Anses 2016c). Cependant, ces recommandations ne prennent pas en compte les impacts de l'alimentation sur d'autres paramètres de durabilité, notamment environnementaux. Or, comme développé dans l'introduction, l'alimentation est un contributeur majeur aux émissions de GES. Dans l'optique de respecter les objectifs français de diviser par quatre les émissions de GES d'ici 2050, on aurait pu imaginer que les recommandations du PNNS aient intégré cette dimension, en évaluant et minimisant les émissions de GES des régimes identifiés.

Références

- Abete I, Romaguera D, Vieira AR, Lopez de Munain A, Norat T (2014) Association between total, processed, red and white meat consumption and all-cause, CVD and IHD mortality: a meta-analysis of cohort studies Br J Nutr 112:762-775 doi:10.1017/s000711451400124x
- ADEME (2019) Bilans GES - Centre de ressources sur les bilans de gaz à effet de serre - <http://www.bilans-ges.ademe.fr/>
- Afshin A, Micha R, Khatibzadeh S, Mozaffarian D (2014) Consumption of nuts and legumes and risk of incident ischemic heart disease, stroke, and diabetes: a systematic review and meta-analysis Am J Clin Nutr 100:278-288 doi:10.3945/ajcn.113.076901
- AFSSA (2007a) Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations - Saisine 2004-SA-0052 - www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Proteines.pdf
- AFSSA (2007b) Avis de l'Afssa relatif à l'établissement de teneurs maximales pertinentes en polychlorobiphényles qui ne sont pas de type dioxine (PCB "non dioxin-like", PCB-NDL) dans divers aliments. (saisine n°2006-SA-0305):28
- Agreste (2018) Agreste - Statistique agricole annuelle (SAA) - <http://agreste.agriculture.gouv.fr/page-d-accueil/article/agreste-donnees-en-ligne>
- Ajzen I (1991) The theory of planned behavior Organ Behav Hum Decis Process 50:179-211
- Akkoyunlu S, Manfredotti C, Cornuéjols A, Darcel N, Delaere F Investigating substitutability of food items in consumption data. In: Second International Workshop on Health Recommender Systems, 2017. p 27
- Aleksandrowicz L, Green R, Joy EJM, Smith P, Haines A (2016) The Impacts of Dietary Change on Greenhouse Gas Emissions, Land Use, Water Use, and Health: A Systematic Review PLoS One 11:e0165797 doi:10.1371/journal.pone.0165797
- Allès B, Baudry J, Méjean C, Touvier M, Péneau S, Hercberg S, Kesse-Guyot E (2017) Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Santé Study Nutrients 9:1023
- American Dietetic Association (2009) Position of the American Dietetic Association: Vegetarian Diets J Am Diet Assoc 109:1266-1282 doi:https://doi.org/10.1016/j.jada.2009.05.027
- Anses (2011a) Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2006sa0359Ra.pdf> Rapport d'expertise collective
- Anses (2011b) Étude de l'alimentation totale française 2 (EAT 2) - <https://www.anses.fr/fr/system/files/PASER2006sa0361Ra2.pdf> Rapport d'expertise collective

- Anses (2016a) Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles - www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf Rapport d'expertise collective
- Anses (2016b) Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles - www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-3.pdf Rapport d'expertise collective
- Anses (2016c) Actualisation des repères du PNNS : révision des repères de consommations alimentaires - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-1.pdf> Rapport d'expertise collective
- Anses (2016d) ANSES-CIQUAL French food composition table version 2016 - Retrieved 12/01/2017 from the Ciquial homepage <https://ciqual.anses.fr/>
- Anses (2016e) Étude de l'alimentation totale infantile - Tome 2 – Partie 1 Méthodologie, limites et incertitudes - Annexe 7 - <https://www.anses.fr/fr/system/files/ERCA2010SA0317Ra-Tome2-Part1.pdf> Rapport d'expertise collective
- Anses (2016f) Updating of the PNNS guidelines: revision of the food-based dietary guidelines - <https://www.anses.fr/en/system/files/NUT2012SA0103Ra-1EN.pdf> Anses opinion - Collective expert report
- Anses (2017) Étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3) - <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf> Rapport d'expertise collective
- Armah SM, Carriquiry A, Sullivan D, Cook JD, Reddy MB (2013) A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults J Nutr 143:1136-1140 doi:10.3945/jn.112.169904
- ATSDR (2005) Toxicological Profile for Alpha-, Beta-, Gamma, and Delta-hexachlorocyclohexane Agency for Toxic Substances and Disease Registry
- Auestad N, Fulgoni III VL (2015) What Current Literature Tells Us about Sustainable Diets: Emerging Research Linking Dietary Patterns, Environmental Sustainability, and Economics Adv Nutr 6:19-36 doi:10.3945/an.114.005694
- Aune D, Chan DSM, Lau R, Vieira R, Greenwood DC, Kampman E, Norat T (2011) Dietary fibre, whole grains, and risk of colorectal cancer: systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies BMJ 343:d6617 doi:10.1136/bmj.d6617
- Aune D et al. (2016) Nut consumption and risk of cardiovascular disease, total cancer, all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and dose-response meta-analysis of prospective studies BMC Med 14:207 doi:10.1186/s12916-016-0730-3
- Bao Y, Han J, Hu FB, Giovannucci EL, Stampfer MJ, Willett WC, Fuchs CS (2013) Association of Nut Consumption with Total and Cause-Specific Mortality N Engl J Med 369:2001-2011 doi:10.1056/NEJMoa1307352

- Barré T, Perignon M, Gazan R, Vieux F, Micard V, Amiot M-J, Darmon N (2018) Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption? *PLoS One* 13:e0191767 doi:10.1371/journal.pone.0191767
- Barré T, Vieux F, Perignon M, Cravedi J-P, Amiot M-J, Micard V, Darmon N (2016) Reaching Nutritional Adequacy Does Not Necessarily Increase Exposure to Food Contaminants: Evidence from a Whole-Diet Modeling Approach *J Nutr* 146:2149-2157 doi:10.3945/jn.116.234294
- Bertin M et al. (2016) Dietary patterns of French adults: associations with demographic, socio-economic and behavioural factors *J Hum Nutr Diet* 29:241-254 doi:doi:10.1111/jhn.12315
- Bianchi CM et al. (2018a) A clear trade-off exists between the theoretical efficiency and acceptability of dietary changes that improve nutrient adequacy during early pregnancy in French women: Combined data from simulated changes modeling and online assessment survey *PLoS One* 13:e0194764
- Bianchi CM, Mariotti F, Verger EO, Huneau J-F (2016) Pregnancy Requires Major Changes in the Quality of the Diet for Nutritional Adequacy: Simulations in the French and the United States Populations *PLoS One* 11:e0149858 doi:10.1371/journal.pone.0149858
- Bianchi F, Dorsel C, Garnett E, Aveyard P, Jebb SA (2018b) Interventions targeting conscious determinants of human behaviour to reduce the demand for meat: a systematic review with qualitative comparative analysis *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* 15:102 doi:10.1186/s12966-018-0729-6
- Bianchi F, Garnett E, Dorsel C, Aveyard P, Jebb SA (2018c) Restructuring physical micro-environments to reduce the demand for meat: a systematic review and qualitative comparative analysis *The Lancet Planetary Health* 2:e384-e397 doi:https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30188-8
- Biesbroek S, Monique Verschuren WM, van der Schouw YT, Sluijs I, Boer JMA, Temme EHM (2018) Identification of data-driven Dutch dietary patterns that benefit the environment and are healthy *Climatic Change* 147:571-583 doi:10.1007/s10584-018-2153-y
- Bradbury EK, Tong YT, Key JT (2017) Dietary Intake of High-Protein Foods and Other Major Foods in Meat-Eaters, Poultry-Eaters, Fish-Eaters, Vegetarians, and Vegans in UK Biobank *Nutrients* 9 doi:10.3390/nu9121317
- Burlingame B, Dernini S Sustainable Diets and Biodiversity: Directions and Solutions for Policy, Research and Action. International Scientific Symposium, Biodiversity and Sustainable Diets United Against Hunger. In, FAO Headquarters, Rome, Italy, 2012. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO),
- Camilleri GM, Verger EO, Huneau J-F, Carpentier F, Dubuisson C, Mariotti F (2013) Plant and

- animal protein intakes are differently associated with nutrient adequacy of the diet of French adults J Nutr 143:1466-1473
- Centre d'Information des Viandes (2005) INAPORC : Etude nutritionnelle de la viande de porc fraiche. <http://www.lessentieldesviandes-pro.org>. Accessed 08/03/2017
- Centre d'Information des Viandes & INRA (2009) Valeurs nutritionnelles des viandes. <http://www.lessentieldesviandes-pro.org/pdf/PDF-tous%20morceaux.pdf>. Accessed 08/03/2017
- CGDD (2018) Chiffres clés du climat France, Europe et Monde - <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-12/datalab-27-CC-climat-nov2017-b.pdf>. Commissariat général au développement durable, La Défense, France
- Chen M, Sun Q, Giovannucci E, Mozaffarian D, Manson JE, Willett WC, Hu FB (2014) Dairy consumption and risk of type 2 diabetes: 3 cohorts of US adults and an updated meta-analysis BMC Med 12:215 doi:10.1186/s12916-014-0215-1
- Clarys P et al. (2014) Comparison of Nutritional Quality of the Vegan, Vegetarian, Semi-Vegetarian, Pesco-Vegetarian and Omnivorous Diet Nutrients 6:1318
- Clonan A, Wilson P, Swift JA, Leibovici DG, Holdsworth M (2015) Red and processed meat consumption and purchasing behaviours and attitudes: impacts for human health, animal welfare and environmental sustainability Public Health Nutr 18:2446-2456 doi:10.1017/s1368980015000567
- Colomb V et al. (2015) Analyses du Cycle de Vie en agriculture : enseignements du programme AGRIBALYSE® vol 5.
- Dagnelie PC, Mariotti F (2017) 1 - Vegetarian Diets: Definitions and Pitfalls in Interpreting Literature on Health Effects of Vegetarianism. In: Mariotti F (ed) Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention. Academic Press, pp 3-10. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803968-7.00001-0>
- Darmon N, Drewnowski A (2015) Contribution of food prices and diet cost to socioeconomic disparities in diet quality and health: a systematic review and analysis Nutr Rev 73:643-660 doi:10.1093/nutrit/nuv027
- De Backer CJS, Hudders L (2015) Meat morals: relationship between meat consumption consumer attitudes towards human and animal welfare and moral behavior Meat Science 99:68-74 doi:<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.08.011>
- de Boer J, Aiking H (2017) Pursuing a Low Meat Diet to Improve Both Health and Sustainability: How Can We Use the Frames that Shape Our Meals? Ecol Econ 142:238-248 doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.037>
- de Gavelle E et al. (2016) Chronic dietary exposure to pesticide residues and associated risk in the French ELFE cohort of pregnant women Environ Int 92-93:533-542

- doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.04.007>
- de Gavelle E, Huneau J-F, Mariotti F (2018) Patterns of Protein Food Intake Are Associated with Nutrient Adequacy in the General French Adult Population *Nutrients* 10:226
- de Vries M, de Boer IJM (2010) Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments *Livestock Science* 128:1-11
doi:<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
- de Gavelle E, Huneau J-F, Fouillet H, Mariotti F (2019) The Initial Dietary Pattern Should Be Considered when Changing Protein Food Portion Sizes to Increase Nutrient Adequacy in French Adults *J Nutr* 149:488-496 doi:10.1093/jn/nxy275
- Delmas G, Jourdan da Silva N, Pihier N, Weill F-X, Vaillant V, De Valk H (2010) Les toxi-infections alimentaires collectives en France entre 2006 et 2008 *Bull Epidemiol Hebd*:31-32
- Deschasaux M et al. (2018) Nutritional quality of food as represented by the FSAm-NPS nutrient profiling system underlying the Nutri-Score label and cancer risk in Europe: Results from the EPIC prospective cohort study *PLoS Med* 15:e1002651
doi:10.1371/journal.pmed.1002651
- Diallo A et al. (2018) Red and processed meat intake and cancer risk: Results from the prospective NutriNet-Santé cohort study *Int J Cancer* 142:230-237
doi:doi:10.1002/ijc.31046
- Dinu M, Abbate R, Gensini GF, Casini A, Sofi F (2017) Vegetarian, vegan diets and multiple health outcomes: A systematic review with meta-analysis of observational studies *Crit Rev Food Sci Nutr* 57:3640-3649 doi:10.1080/10408398.2016.1138447
- Doro E, Réquillart V (2018) Sustainable diets: are nutritional objectives and low-carbon-emission objectives compatible? Working papers n° 18-913
- Dubuisson C, Lioret S, Touvier M, Dufour A, Calamassi-Tran G, Volatier J-L, Lafay L (2010) Trends in food and nutritional intakes of French adults from 1999 to 2007: results from the INCA surveys *Br J Nutr* 103:1035-1048
- Dumont B et al. (2016) Rôles, impacts et services issus des élevages en Europe. Synthèse du rapport d'expertise scientifique collective
- EFSA, FAO, WHO (2011) Towards a harmonised Total Diet Study approach: a guidance document *EFSA Journal* 9:66 doi:10.2903/j.efsa.2011.2450
- EFSA CONTAM Panel (2009a) Cadmium in food - Scientific opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain *EFSA Journal* 7:980 doi:10.2903/j.efsa.2009.980
- EFSA CONTAM Panel (2009b) Scientific Opinion on Arsenic in Food *EFSA Journal* 7:1351
doi:doi:10.2903/j.efsa.2009.1351
- EFSA CONTAM Panel (2010) Scientific Opinion on Lead in Food *EFSA Journal* 8:1570
doi:doi:10.2903/j.efsa.2010.1570

- EFSA CONTAM Panel (2012) Scientific Opinion on the risk for public health related to the presence of mercury and methylmercury in food EFSA Journal 10:2985
doi:doi:10.2903/j.efsa.2012.2985
- EFSA CONTAM Panel (2014) Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of chromium in food and drinking water EFSA Journal 12:3595
doi:doi:10.2903/j.efsa.2014.3595
- EFSA CONTAM Panel (2015a) Scientific Opinion on acrylamide in food EFSA Journal 13:4104
doi:doi:10.2903/j.efsa.2015.4104
- EFSA CONTAM Panel (2015b) Scientific Opinion on the risks to public health related to the presence of nickel in food and drinking water EFSA Journal 13:4002
doi:doi:10.2903/j.efsa.2015.4002
- EFSA CONTAM Panel (2016) Scientific Opinion on the re-evaluation of sulfur dioxide (E 220), sodium sulfite (E 221), sodium bisulfite (E 222), sodium metabisulfite (E 223), potassium metabisulfite (E 224), calcium sulfite (E 226), calcium bisulfite (E 227) and potassium bisulfite (E 228) as food additives EFSA Journal 14:4438
doi:doi:10.2903/j.efsa.2016.4438
- EFSA CONTAM Panel (2018) Risk for animal and human health related to the presence of dioxins and dioxin-like PCBs in feed and food EFSA Journal 16:e05333
doi:10.2903/j.efsa.2018.5333
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2010) Scientific Opinion on Dietary Reference Values for fats, including saturated fatty acids, polyunsaturated fatty acids, monounsaturated fatty acids, trans fatty acids, and cholesterol EFSA Journal 8:1461 doi:10.2903/j.efsa.2010.1461
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2015) Scientific opinion on dietary references values for phosphorus EFSA journal 13:4185
doi:10.2903/j.efsa.2015.4185
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2016a) Scientific opinion of dietary reference values for potassium EFSA Journal 14:e04592
doi:10.2903/j.efsa.2016.4592
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2016b) Scientific opinion on dietary reference values for thiamin EFSA journal 14:4653
doi:10.2903/j.efsa.2016.4653
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2016c) Scientific opinion on dietary Reference Values for vitamin B6 EFSA Journal 14:e04485-n/a
doi:10.2903/j.efsa.2016.4485
- EFSA Panel on Dietetic Products, Nutrition and Allergies (NDA) (2017) Scientific opinion on dietary Reference Values for riboflavin EFSA Journal 15:e04919

doi:10.2903/j.efsa.2017.4919

- Escalon H, Bossard C, Beck F, Bachelot-Narquin R (2009) Baromètre santé nutrition 2008 - <http://inpes.santepubliquefrance.fr/Barometres/barometre-sante-nutrition-2008/pdf/typologie-des-mangeurs.pdf>. Saint-Denis
- Estève-Saillard M (2016) Tendances de marché en France sur la présence des protéines végétales dans les produits alimentaires OCL 23:D403
- Etemadi A, Sinha R, Ward MH, Graubard BI, Inoue-Choi M, Dawsey SM, Abnet CC (2017) Mortality from different causes associated with meat, heme iron, nitrates, and nitrites in the NIH-AARP Diet and Health Study: population based cohort study BMJ 357:j1957 doi:10.1136/bmj.j1957
- European Food Safety Authority (EFSA) (2014) Dietary exposure to inorganic arsenic in the European population EFSA Journal 12:3597 doi:doi:10.2903/j.efsa.2014.3597
- FAO (2018) FAOSTAT - <http://www.fao.org/faostat/en/#data/CL>
- FAO Expert Consultation (2011) Dietary protein quality evaluation in human nutrition FAO Food Nutr Pap 92:1-66
- Feskens EJM, Sluik D, van Woudenberg GJ (2013) Meat Consumption, Diabetes, and Its Complications Curr Diab Rep 13:298-306 doi:10.1007/s11892-013-0365-0
- Fleury S et al. (2017) Exposure to contaminants and nutritional intakes in a French vegetarian population Food Chem Toxicol 109:218-229 doi:https://doi.org/10.1016/j.fct.2017.07.048
- Foley JA et al. (2011) Solutions for a cultivated planet Nature 478:337 doi:10.1038/nature10452
- FranceAgriMer (2015) Impact de la crise économique sur la consommation de viande et évolution des comportements alimentaires Les synthèses de FranceAgriMer 21
- Fulgoni VL (2008) Current protein intake in America: analysis of the National Health and Nutrition Examination Survey, 2003–2004 Am J Clin Nutr 87:1554S-1557S
- Gazan R, Béchaux C, Crépet A, Sirot V, Drouillet-Pinard P, Dubuisson C, Havard S (2016) Dietary patterns in the French adult population: a study from the second French national cross-sectional dietary survey (INCA2) (2006–2007) Br J Nutr 116:300-315 doi:10.1017/s0007114516001549
- Gazan R, Brouzes CMC, Vieux F, Maillot M, Lluch A, Darmon N (2018) Mathematical Optimization to Explore Tomorrow's Sustainable Diets: A Narrative Review Adv Nutr 9:602-616 doi:10.1093/advances/nmy049
- Gerber PJ et al. (2013) Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO),
- Godfray HCJ et al. (2018) Meat consumption, health, and the environment Science 361

doi:10.1126/science.aam5324

- Graça J, Calheiros MM, Oliveira A (2015a) Attached to meat? (Un)Willingness and intentions to adopt a more plant-based diet *Appetite* 95:113-125 doi:<https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.06.024>
- Graça J, Oliveira A, Calheiros MM (2015b) Meat, beyond the plate. Data-driven hypotheses for understanding consumer willingness to adopt a more plant-based diet *Appetite* 90:80-90 doi:<https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.02.037>
- Green R et al. (2015) The potential to reduce greenhouse gas emissions in the UK through healthy and realistic dietary change *Climatic Change* 129:253-265 doi:10.1007/s10584-015-1329-y
- Guo J, Astrup A, Lovegrove JA, Gijsbers L, Givens DI, Soedamah-Muthu SS (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 doi:10.1007/s10654-017-0243-1
- Halkjaer J et al. (2009) Intake of total, animal and plant proteins, and their food sources in 10 countries in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition *Eur J Clin Nutr* 63:S16-S36
- Hallström E, Carlsson-Kanyama A, Börjesson P (2015) Environmental impact of dietary change: a systematic review *Journal of Cleaner Production* 91:1-11 doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.008>
- Hartikainen H, Pulkkinen H (2016) Summary of the chosen methodologies and practices to produce GHGE-estimates for an average European diet *Natural Resources and Bioeconomy Studies* 58
- Hartmann C, Siegrist M (2017) Consumer perception and behaviour regarding sustainable protein consumption: A systematic review *Trends in Food Science & Technology* 61:11-25 doi:<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.12.006>
- HCSP (2018) Avis relatif à l'évolution des messages sanitaires apposés sur les actions de promotion des acteurs économiques dans le cadre du PNNS 4 - https://www.hcsp.fr/Explore.cgi/Telecharger?NomFichier=hcspa20180703_voldesme_ssandanlecaddepolnut.p.pdf. Haut Conseil de la Santé Publique,
- Henderson BB, Gerber PJ, Hilinski TE, Falcucci A, Ojima DS, Salvatore M, Conant RT (2015) Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: Modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices *Agric Ecosyst Environ* 207:91-100 doi:<https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.029>
- HLPE (2018) Nutrition et systèmes alimentaires. Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition du Comité de la sécurité alimentaire mondiale

http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/hlpe/hlpe_documents/HLPE_Reports/HLPE-Report-12_FR.pdf. Rome

- Horgan GW, Perrin A, Whybrow S, Macdiarmid JI (2016) Achieving dietary recommendations and reducing greenhouse gas emissions: modelling diets to minimise the change from current intakes *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity* 13:46 doi:10.1186/s12966-016-0370-1
- Irz X, Leroy P, Réquillart V, Soler L-G (2016) Welfare and sustainability effects of dietary recommendations *Ecol Econ* 130:139-155 doi:https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.06.025
- Jannasch F, Riordan F, Andersen LF, Schulze MB (2018) Exploratory dietary patterns: a systematic review of methods applied in pan-European studies and of validation studies *Br J Nutr* 120:601-611 doi:10.1017/s0007114518001800
- JECFA Safety evaluation of certain mycotoxins in food: prepared by the Fifty-sixth meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). In: Safety evaluation of certain mycotoxins in food: prepared by the Fifty-sixth meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), 2001.
- JECFA Safety evaluation of certain contaminants in food: prepared by the Seventy-second meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA). In: Safety evaluation of certain contaminants in food: prepared by the Seventy-second meeting of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA), 2011.
- Jones AD, Hoey L, Blesh J, Miller L, Green A, Shapiro LF (2016) A Systematic Review of the Measurement of Sustainable Diets *Adv Nutr* 7:641-664 doi:10.3945/an.115.011015
- Kane-Diallo A et al. (2018) Association between a pro plant-based dietary score and cancer risk in the prospective NutriNet-santé cohort *Int J Cancer* 143:2168-2176 doi:doi:10.1002/ijc.31593
- Kantar WorldPanel (2006) French household consumer panel—Kantar worldpanel. Available from: <http://www.kantarworldpanel.com/global/Sectors>
- Kurihara A et al. (2019) Vegetable Protein Intake was Inversely Associated with Cardiovascular Mortality in a 15-Year Follow-Up Study of the General Japanese Population *Journal of Atherosclerosis and Thrombosis* 26:198-206 doi:10.5551/jat.44172
- Latvala T, Niva M, Mäkelä J, Pouta E, Heikkilä J, Kotro J, Forsman-Hugg S (2012) Diversifying meat consumption patterns: Consumers' self-reported past behaviour and intentions for change *Meat Science* 92:71-77 doi:https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.04.014
- Leufroy A, Noël L, Dufailly V, Beauchemin D, Guérin T (2011) Determination of seven arsenic species in seafood by ion exchange chromatography coupled to inductively coupled plasma-mass spectrometry following microwave assisted extraction: Method validation

- and occurrence data Talanta 83:770-779
doi:<https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.10.050>
- Lin P-H, Miwa S, Li Y-J, Wang Y, Levy E, Lastor K, Champagne C (2010) Factors Influencing Dietary protein sources in the PREMIER trial population J Am Diet Assoc 110:291-295
doi:10.1016/j.jada.2009.10.041
- Long MW et al. (2015) Cost Effectiveness of a Sugar-Sweetened Beverage Excise Tax in the U.S Am J Prev Med 49:112-123 doi:<https://doi.org/10.1016/j.amepre.2015.03.004>
- Macdiarmid JI, Douglas F, Campbell J (2016) Eating like there's no tomorrow: Public awareness of the environmental impact of food and reluctance to eat less meat as part of a sustainable diet Appetite 96:487-493
doi:<https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.10.011>
- Mailliot M, Vieux F, Amiot MJ, Darmon N (2009) Individual diet modeling translates nutrient recommendations into realistic and individual-specific food choices Am J Clin Nutr 91:421-430 doi:10.3945/ajcn.2009.28426
- Malik VS, Li Y, Tobias DK, Pan A, Hu FB (2016) Dietary Protein Intake and Risk of Type 2 Diabetes in US Men and Women Am J Epidemiol 183:715-728 doi:10.1093/aje/kwv268
- Mangano KM, Sahni S, Kiel DP, Tucker KL, Dufour AB, Hannan MT (2015) Bone Mineral Density and Protein-Derived Food Clusters from the Framingham Offspring Study J Acad Nutr Diet 115:1605-1613.e1601 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jand.2015.04.001>
- Mangano KM, Sahni S, Kiel DP, Tucker KL, Dufour AB, Hannan MT (2017) Dietary protein is associated with musculoskeletal health independently of dietary pattern: the Framingham Third Generation Study Am J Clin Nutr 105:714-722
doi:10.3945/ajcn.116.136762
- Mariotti F (2016) Chapter 2 - Protein Intake Throughout Life and Current Dietary Recommendations. In: Dardevet D (ed) The Molecular Nutrition of Amino Acids and Proteins. Academic Press, Boston, pp 13-25. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802167-5.00002-5>
- Mariotti F (2017) 35 - Plant Protein, Animal Protein, and Protein Quality. In: Mariotti F (ed) Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention. Academic Press, pp 621-642. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803968-7.00035-6>
- Mariotti F (2019) Animal and Plant Protein Sources and Cardiometabolic Health Adv Nutr In press doi:<https://doi.org/10.1093/advances/nmy110>
- Martin A, Touvier M, Volatier J-L (2004) The Basis for Setting the Upper Range of Adequate Intake for Regulation of Macronutrient Intakes, Especially Amino Acids J Nutr 134:1625S-1629S
- Masset G, Vieux F, Verger EO, Soler L-G, Touazi D, Darmon N (2014) Reducing energy intake and energy density for a sustainable diet: a study based on self-selected diets in French

- adults *Am J Clin Nutr* 99:1460-1469 doi:10.3945/ajcn.113.077958
- Mayhew AJ, de Souza RJ, Meyre D, Anand SS, Mente A (2016) A systematic review and meta-analysis of nut consumption and incident risk of CVD and all-cause mortality *Br J Nutr* 115:212-225 doi:10.1017/s0007114515004316
- Miller LV, Krebs NF, Hambidge KM (2007) A mathematical model of zinc absorption in humans as a function of dietary zinc and phytate *J Nutr* 137:135-141
- Moretti D (2017) 39 - Plant-Based Diets and Iron Status. In: Mariotti F (ed) *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*. Academic Press, pp 715-727. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803968-7.00039-3>
- Mozaffarian D, Rimm EB (2006) Fish intake, contaminants, and human health: Evaluating the risks and the benefits *JAMA* 296:1885-1899 doi:10.1001/jama.296.15.1885
- Mullee A et al. (2017) Vegetarianism and meat consumption: A comparison of attitudes and beliefs between vegetarian, semi-vegetarian, and omnivorous subjects in Belgium *Appetite* 114:299-305 doi:<https://doi.org/10.1016/j.appet.2017.03.052>
- Newby P, Tucker KL (2004) Empirically derived eating patterns using factor or cluster analysis: a review *Nutr Rev* 62:177-203
- Norat T et al. (2005) Meat, Fish, and Colorectal Cancer Risk: The European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition JNCI: Journal of the National Cancer Institute 97:906-916 doi:10.1093/jnci/dji164
- Nougadère A, Reninger J-C, Volatier J-L, Leblanc J-C (2011) Chronic dietary risk characterization for pesticide residues: A ranking and scoring method integrating agricultural uses and food contamination data *Food Chem Toxicol* 49:1484-1510 doi:<https://doi.org/10.1016/j.fct.2011.03.024>
- Oberli M et al. (2015) High True Ileal Digestibility but Not Postprandial Utilization of Nitrogen from Bovine Meat Protein in Humans Is Moderately Decreased by High-Temperature, Long-Duration Cooking *J Nutr* 145:2221-2228
- Orlich MJ, Singh P, Sabaté J, et al. (2013) Vegetarian dietary patterns and mortality in adventist health study 2 *JAMA Internal Medicine* 173:1230-1238 doi:10.1001/jamainternmed.2013.6473
- Osman M, Thornton K (2019) Traffic light labelling of meals to promote sustainable consumption and healthy eating *Appetite* 138:60-71 doi:<https://doi.org/10.1016/j.appet.2019.03.015>
- Pan A et al. (2012) Red meat consumption and mortality: Results from 2 prospective cohort studies *Arch Intern Med* 172:555-563 doi:10.1001/archinternmed.2011.2287
- Pan A, Sun Q, Bernstein AM, Schulze MB, Manson JE, Willett WC, Hu FB (2011) Red meat consumption and risk of type 2 diabetes: 3 cohorts of US adults and an updated meta-analysis *Am J Clin Nutr* 94:1088-1096 doi:10.3945/ajcn.111.018978

- Pasiakos SM, Agarwal S, Lieberman HR, Fulgoni VL (2015) Sources and Amounts of Animal, Dairy, and Plant Protein Intake of US Adults in 2007–2010 *Nutrients* 7:5322
- Payne CLR, Scarborough P, Cobiac L (2016) Do low-carbon-emission diets lead to higher nutritional quality and positive health outcomes? A systematic review of the literature *Public Health Nutr* 19:2654-2661 doi:10.1017/s1368980016000495
- Perignon M, Barré T, Gazan R, Amiot M-J, Darmon N (2018) The bioavailability of iron, zinc, protein and vitamin A is highly variable in French individual diets: Impact on nutrient inadequacy assessment and relation with the animal-to-plant ratio of diets *Food Chem* 238:73-81 doi:https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.070
- Perignon M et al. (2016) How low can dietary greenhouse gas emissions be reduced without impairing nutritional adequacy, affordability and acceptability of the diet? A modelling study to guide sustainable food choices *Public Health Nutr* 19:2662-2674 doi:10.1017/s1368980016000653
- Perignon M, Vieux F, Soler L-G, Masset G, Darmon N (2017) Improving diet sustainability through evolution of food choices: review of epidemiological studies on the environmental impact of diets *Nutr Rev* 75:2-17 doi:10.1093/nutrit/nuw043
- Pessiot J-F, Truong T-V, Usunier N, Amini M-R, Gallinari P Factorisation en matrices non négatives pour le filtrage collaboratif. In: CORIA, 2006. pp 315-326
- Petti A, Palmieri B, Vadalà M, Laurino C (2017) Vegetarianism and veganism: not only benefits but also gaps. A review *Progress in Nutrition* 19:229-242 doi:10.23751/pn.v19i3.5229
- Phillips SM, Fulgoni VL, Heaney RP, Nicklas TA, Slavin JL, Weaver CM (2015) Commonly consumed protein foods contribute to nutrient intake, diet quality, and nutrient adequacy *Am J Clin Nutr* 101:1346S-1352S doi:10.3945/ajcn.114.084079
- Pohjolainen P, Vinnari M, Jokinen P (2015) Consumers' perceived barriers to following a plant-based diet *British Food Journal* 117:1150-1167 doi:10.1108/bfj-09-2013-0252
- Poquet D, Chambaron-Ginhac S, Issanchou S, Monnery-Patris S (2017) Interroger les représentations sociales afin d'identifier des leviers en faveur d'un rééquilibrage entre protéines animales et végétales : approche psychosociale *Cahiers de Nutrition et de Diététique* 52:193-201 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cnd.2017.05.002>
- Pribis P, Pencak RC, Grajales T (2010) Beliefs and Attitudes toward Vegetarian Lifestyle across Generations *Nutrients* 2 doi:10.3390/nu2050523
- Provenza FD, Kronberg SL, Gregorini P (2019) Is Grassfed Meat and Dairy Better for Human and Environmental Health? *Frontiers in Nutrition* 6 doi:10.3389/fnut.2019.00026
- Rand WM, Pellett PL, Young VR (2003) Meta-analysis of nitrogen balance studies for estimating protein requirements in healthy adults *Am J Clin Nutr* 77:109-127
- Richter CK, Skulas-Ray AC, Champagne CM, Kris-Etherton PM (2015) Plant Protein and Animal Proteins: Do They Differentially Affect Cardiovascular Disease Risk? *Adv Nutr*

- 6:712-728 doi:10.3945/an.115.009654
- Ritchie H, Reay DS, Higgins P (2018) The impact of global dietary guidelines on climate change Global Environmental Change 49:46-55 doi:<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.02.005>
- Rizzo NS, Jaceldo-Siegl K, Sabate J, Fraser GE (2013) Nutrient Profiles of Vegetarian and Nonvegetarian Dietary Patterns J Acad Nutr Diet 113:1610-1619 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jand.2013.06.349>
- Rohrmann S et al. (2013) Meat consumption and mortality - results from the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition BMC Med 11:63 doi:10.1186/1741-7015-11-63
- Rose D, Heller MC, Willits-Smith AM, Meyer RJ (2019) Carbon footprint of self-selected US diets: nutritional, demographic, and behavioral correlates doi:10.1093/ajcn/nqy327
- Ruby MB, Alvarenga MS, Rozin P, Kirby TA, Richer E, Rutsztein G (2016) Attitudes toward beef and vegetarians in Argentina, Brazil, France, and the USA Appetite 96:546-554 doi:<https://doi.org/10.1016/j.appet.2015.10.018>
- Santé Publique France (2019) Recommandations relatives à l'alimentation, à l'activité physique et à la sédentarité pour les adultes - <http://invs.santepubliquefrance.fr/Publications-et-outils/Rapports-et-syntheses/Maladies-chroniques-et-traumatismes/2019/Recommandations-relatives-a-l-alimentation-a-l-activite-physique-et-a-la-sedentarite-pour-les-adultes:62>
- Satija A et al. (2016) Plant-Based Dietary Patterns and Incidence of Type 2 Diabetes in US Men and Women: Results from Three Prospective Cohort Studies PLoS Med 13:e1002039 doi:10.1371/journal.pmed.1002039
- Satija A et al. (2017) Healthful and Unhealthful Plant-Based Diets and the Risk of Coronary Heart Disease in U.S. Adults J Am Coll Cardiol 70:411-422 doi:<https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.05.047>
- Scarborough P, Allender S, Clarke D, Wickramasinghe K, Rayner M (2012) Modelling the health impact of environmentally sustainable dietary scenarios in the UK Eur J Clin Nutr 66:710 doi:10.1038/ejcn.2012.34 <https://www.nature.com/articles/ejcn201234#supplementary-information>
- Scarborough P, Appleby PN, Mizdrak A, Briggs ADM, Travis RC, Bradbury KE, Key TJ (2014a) Dietary greenhouse gas emissions of meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans in the UK Climatic Change 125:179-192 doi:10.1007/s10584-014-1169-1
- Scarborough P, Harrington RA, Mizdrak A, Zhou LM, Doherty A (2014b) The Preventable Risk Integrated ModEl and Its Use to Estimate the Health Impact of Public Health Policy Scenarios Scientifica 2014:21 doi:10.1155/2014/748750
- Schösler H, de Boer J, Boersema JJ (2012) Can we cut out the meat of the dish? Constructing

- consumer-oriented pathways towards meat substitution *Appetite* 58:39-47
doi:<https://doi.org/10.1016/j.appet.2011.09.009>
- Schösler H, de Boer J, Boersema JJ (2014) Fostering more sustainable food choices: Can Self-Determination Theory help? *Food Qual Prefer* 35:59-69
doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2014.01.008>
- Schwingshackl L et al. (2017) Food groups and risk of type 2 diabetes mellitus: a systematic review and meta-analysis of prospective studies *Eur J Epidemiol* 32:363-375
doi:10.1007/s10654-017-0246-y
- Seconda L et al. (2018a) Comparing nutritional, economic, and environmental performances of diets according to their levels of greenhouse gas emissions *Climatic Change* 148:155-172 doi:10.1007/s10584-018-2195-1
- Seconda L et al. (2018b) Identification of sustainable dietary patterns by a multicriteria approach in the NutriNet-Santé cohort *Journal of Cleaner Production* 196:1256-1265
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.143>
- Shang X, Scott D, Hodge A, English DR, Giles GG, Ebeling PR, Sanders KM (2017) Dietary protein from different food sources, incident metabolic syndrome and changes in its components: An 11-year longitudinal study in healthy community-dwelling adults *Clin Nutr* 36:1540-1548 doi:<https://doi.org/10.1016/j.clnu.2016.09.024>
- Sinha R, Cross AJ, Graubard BI, Leitzmann MF, Schatzkin A (2009) Meat intake and mortality: A prospective study of over half a million people *Arch Intern Med* 169:562-571
doi:10.1001/archinternmed.2009.6
- Sirot V, Guérin T, Volatier JL, Leblanc JC (2009) Dietary exposure and biomarkers of arsenic in consumers of fish and shellfish from France *Sci Total Environ* 407:1875-1885
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.11.050>
- Sobiecki JG, Appleby PN, Bradbury KE, Key TJ (2016) High compliance with dietary recommendations in a cohort of meat eaters, fish eaters, vegetarians, and vegans: results from the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition–Oxford study *Nutr Res* 36:464-477 doi:<https://doi.org/10.1016/j.nutres.2015.12.016>
- Song M, Fung TT, Hu FB, et al. (2016) Association of animal and plant protein intake with all-cause and cause-specific mortality *JAMA Internal Medicine* 176:1453-1463
doi:10.1001/jamainternmed.2016.4182
- Soret S, Mejia A, Batech M, Jaceldo-Siegl K, Harwatt H, Sabaté J (2014) Climate change mitigation and health effects of varied dietary patterns in real-life settings throughout North America *Am J Clin Nutr* 100:490S-495S doi:10.3945/ajcn.113.071589
- Springmann M, Godfray HCJ, Rayner M, Scarborough P (2016) Analysis and valuation of the health and climate change cobenefits of dietary change *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113:4146-4151 doi:10.1073/pnas.1523119113

- Stoll-Kleemann S, Schmidt UJ (2017) Reducing meat consumption in developed and transition countries to counter climate change and biodiversity loss: a review of influence factors *Regional Environmental Change* 17:1261-1277 doi:10.1007/s10113-016-1057-5
- Suga H, Murakami K, Sasaki S (2013) Development of an amino acid composition database and estimation of amino acid intake in Japanese adults *Asia Pac J Clin Nutr* 22:188-199
- Tavoularis G, Hébel P (2017) Fruits et légumes : les Français suivent de moins en moins la recommandation - <https://www.credoc.fr/download/pdf/4p/292.pdf> *Consommation et modes de vie* 292
- Tavoularis G, Sauvage É (2018) Les nouvelles générations transforment la consommation de viande - <https://www.credoc.fr/download/pdf/4p/CMV300.pdf> *Consommation et modes de vie* 300
- Tharrey M, Mariotti F, Mashchak A, Barbillon P, Delattre M, Fraser GE (2018) Patterns of plant and animal protein intake are strongly associated with cardiovascular mortality: the Adventist Health Study-2 cohort *Int J Epidemiol* 47:1603-1612 doi:10.1093/ije/dyy030
- Tilman D, Clark M (2014) Global diets link environmental sustainability and human health *Nature* 515:518 doi:10.1038/nature13959
- Tome D (2013) Digestibility issues of vegetable versus animal proteins: protein and amino acid requirements--functional aspects *Food Nutr Bull* 34:272-274
- Tucker KL (2010) Dietary patterns, approaches, and multicultural perspective *Applied physiology, nutrition, and metabolism* 35:211-218
- Tyszler M, Kramer G, Blonk H (2016) Just eating healthier is not enough: studying the environmental impact of different diet scenarios for Dutch women (31–50 years old) by linear programming *The International Journal of Life Cycle Assessment* 21:701-709 doi:10.1007/s11367-015-0981-9
- U.S. Department of Health and Human Services and U.S. Department of Agriculture (2015) 2015–2020 Dietary guidelines for Americans - Available at <http://health.gov/dietaryguidelines/2015/guidelines/> (accessed on 01/03/2018) vol 8th Edition. Washington (DC)
- van Dooren C (2018) A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally *Frontiers in Nutrition* 5 doi:10.3389/fnut.2018.00048
- van Dooren C, Tyszler M, Kramer GFH, Aiking H (2015) Combining Low Price, Low Climate Impact and High Nutritional Value in One Shopping Basket through Diet Optimization by Linear Programming *Sustainability* 7:12837
- van Nielen M et al. (2014) Dietary Protein Intake and Incidence of Type 2 Diabetes in Europe: The EPIC-InterAct Case-Cohort Study *Diabetes Care* 37:1854-1862 doi:10.2337/dc13-

- Vandenbroele J, Slabbinck H, Van Kerckhove A, Vermeir I (2018) Curbing portion size effects by adding smaller portions at the point of purchase *Food Qual Prefer* 64:82-87 doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2017.10.015>
- Vanhonacker F, Van Loo EJ, Gellynck X, Verbeke W (2013) Flemish consumer attitudes towards more sustainable food choices *Appetite* 62:7-16 doi:<https://doi.org/10.1016/j.appet.2012.11.003>
- Verger EO, Holmes BA, Huneau JF, Mariotti F (2014) Simple Changes within Dietary Subgroups Can Rapidly Improve the Nutrient Adequacy of the Diet of French Adults *J Nutr* 144:929-936 doi:10.3945/jn.113.188284
- Verger EO, Mariotti F, Holmes BA, Paineau D, Huneau J-F (2012) Evaluation of a diet quality index based on the probability of adequate nutrient intake (PANDiet) using national French and US dietary surveys *PLoS One* 7:e42155
- Vieux F, Darmon N, Touazi D, Soler LG (2012) Greenhouse gas emissions of self-selected individual diets in France: Changing the diet structure or consuming less? *Ecol Econ* 75:91-101 doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.01.003>
- Vieux F, Perignon M, Gazan R, Darmon N (2018) Dietary changes needed to improve diet sustainability: are they similar across Europe? *Eur J Clin Nutr* 72:951-960 doi:10.1038/s41430-017-0080-z
- Vieux F, Soler L-G, Touazi D, Darmon N (2013) High nutritional quality is not associated with low greenhouse gas emissions in self-selected diets of French adults *Am J Clin Nutr* doi:10.3945/ajcn.112.035105
- Vinnari M, Vinnari E (2014) A Framework for Sustainability Transition: The Case of Plant-Based Diets *Journal of Agricultural and Environmental Ethics* 27:369-396 doi:10.1007/s10806-013-9468-5
- WCRF/AICR (2007) World Cancer Research Fund, American Institute for Cancer Research. Second Expert Report: food, nutrition, physical activity, and the prevention of cancer: a global perspective - http://www.aicr.org/assets/docs/pdf/reports/Second_Expert_Report.pdf
- Weibel C, Ohnmacht T, Schaffner D, Kossmann K (2019) Reducing individual meat consumption: the role of socio-psychological factors and the stage model of behavioral change *Food Qual Prefer* doi:<https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2018.11.011>
- Willett W et al. (2019) Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems *The Lancet* doi:[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(18\)31788-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(18)31788-4)
- Wirfält E, Drake I, Wallström P (2013) What do review papers conclude about food and dietary patterns? *Food Nutr Res* 57:20523

- Wyker BA, Davison KK (2010) Behavioral Change Theories Can Inform the Prediction of Young Adults' Adoption of a Plant-based Diet *J Nutr Educ Behav* 42:168-177 doi:<https://doi.org/10.1016/j.jneb.2009.03.124>
- Ye EQ, Chacko SA, Chou EL, Kugizaki M, Liu S (2012) Greater Whole-Grain Intake Is Associated with Lower Risk of Type 2 Diabetes, Cardiovascular Disease, and Weight Gain *J Nutr* 142:1304-1313 doi:10.3945/jn.111.155325
- Zetlaoui M, Feinberg M, Verger P, Cl  men  on S (2011) Extraction of food consumption systems by nonnegative matrix factorization (NMF) for the assessment of food choices *Biometrics* 67:1647-1658
- Zheng J, Huang T, Yu Y, Hu X, Yang B, Li D (2012) Fish consumption and CHD mortality: an updated meta-analysis of seventeen cohort studies *Public Health Nutr* 15:725-737 doi:10.1017/s1368980011002254
- Zong G, Gao A, Hu FB, Sun Q (2016) Whole Grain Intake and Mortality From All Causes, Cardiovascular Disease, and Cancer *Circulation* 133:2370-2380 doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.115.021101

Titre : Modélisation de trajectoires acceptables de réarrangement de la consommation de sources protéiques pour augmenter l'adéquation nutritionnelle et impacts sur la durabilité

Mots clés : consommation protéique, modélisation, adéquation nutritionnelle, acceptabilité, durabilité

Résumé : Dans les pays occidentaux, la consommation de protéines animales, majoritaire, diminue depuis une décennie. Elle est, dans la majorité des cas, associée négativement à différents paramètres de durabilité, et les études modélisant des régimes durables ont montré que les différents paramètres n'étaient pas toujours compatibles. Des régimes améliorant largement différents paramètres de durabilité ont été modélisés, mais la prise en compte de l'acceptabilité culturelle est insuffisante et nécessite des approfondissements. L'objectif de cette thèse était de modéliser des trajectoires acceptables de réarrangement de la consommation de sources protéiques pour augmenter l'adéquation nutritionnelle et d'en évaluer les impacts sur la durabilité. L'étude des consommations de sources de protéines en France a permis de conclure que les apports en protéines sont adéquats pour l'ensemble de la population, mais qu'il existe différents profils de consommation protéique, caractérisés par des niveaux de sécurité nutritionnelle différents.

Une étude réalisée en 2018 a permis d'établir que les niveaux de consommation de viande étaient prédits par les attitudes, les normes sociales, et l'auto-efficacité perçue vis-à-vis de la réduction de la consommation de viande. Pour les travaux de modélisation pas-à-pas de l'alimentation, il a été considéré acceptable pour un individu de consommer un nouvel aliment, si celui-ci était largement consommé par des individus au profil de consommation protéique similaire. Cette hypothèse a été validée par une enquête en 2018. Les travaux de modélisation ont permis d'identifier que certaines recommandations alimentaires étaient efficaces pour l'ensemble de la population, mais que d'autres étaient spécifiques à certains profils de consommation protéique, caractérisés par des profils nutritionnels et des répertoires alimentaires spécifiques. Enfin, des modèles ont permis d'identifier que viser systématiquement plus de protéines végétales lors des premières modifications diététiques permet, malgré une adéquation nutritionnelle légèrement plus faible, d'obtenir de meilleurs paramètres de durabilité.

Title: Modelling of acceptable trajectories of rearrangement of protein source consumption to increase nutrient adequacy and impacts on sustainability

Keywords: protein dietary intake, modelling, nutrient adequacy, acceptability, sustainability

Abstract: In Western countries, the consumption of animal protein, which is the predominant protein source, has been decreasing over the last decade. This consumption has been negatively associated with different sustainability parameters in the majority of cases, and studies modelling sustainable diets have shown that the different parameters are not always compatible. Diets that significantly improve different sustainability parameters have been modelled, but the consideration of cultural acceptability is insufficient and requires further investigation. The objective of this thesis was to model acceptable trajectories of rearrangement of protein source consumption to increase nutritional adequacy and to evaluate its impacts on sustainability. The study of protein source consumption in France led to the conclusion that protein intake is adequate for the entire population, but that there are different profiles of protein intake characterized by different levels of nutritional security.

A study conducted in 2018 found that meat consumption levels were predicted by attitudes, social norms, and perceived behavioral control related to the reduction of meat consumption. For the stepwise dietary modelling study, it was considered acceptable for an individual to consume a new food if it was widely consumed by individuals with a similar profile of protein intake. This hypothesis was validated by a survey conducted in 2018. The modelling work identified that some dietary recommendations were effective for the general population, but others were specific to certain profiles of protein intake characterized by specific nutritional profiles and food repertoires. Finally, models have identified that systematically targeting more plant proteins during the first dietary modifications allows, despite a slightly lower nutritional adequacy, to obtain better sustainability parameters.

