

Prise en compte de la biodisponibilité des nutriments lors de l'identification de régimes alimentaires plus durables : la consommation de viande est-elle toujours à réduire? *

Integrating nutrient bioavailability when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption?

Marlène Perignon^{1,2}, Tangui Barré², Rozenn Gazan³, Florent Vieux³, Valérie Micard⁴, Marie-Josèphe Amiot^{1,2}, Nicole Darmon^{1,2}

Adresses

¹ MOISA, INRA, CIRAD, CIHEAM-IAMM, Montpellier SupAgro, Univ Montpellier, 34060 Montpellier, France,

² NORT, Aix-Marseille Univ, INSERM, INRA, 13385 Marseille, France,

³ MS-Nutrition, Faculte de Medecine de la Timone, 13005 Marseille, France,

⁴ IATE, Montpellier SupAgro, CIRAD, INRA, Univ Montpellier, 34060 Montpellier, France

*Ce travail a été traduit et adapté pour republication avec la permission de PLoS One à partir de Barré T, Perignon M, Gazan R, Vieux F, Micard V, Amiot M-J, et al. Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption? de Souza RJ, editor. PLoS One. Public Library of Science; 2018;13: e0191767. doi:10.1371/journal.pone.0191767. PLoS One n'est en aucun cas responsable de l'exactitude de la traduction. Le traducteur est seul responsable de la traduction dans cette publication.

Résumé

Les problèmes actuels de santé publique et d'environnement nécessitent d'identifier des changements de régimes qui améliorent la qualité nutritionnelle et réduisent l'impact environnemental de notre alimentation. Une approche d'optimisation de l'alimentation a été utilisée pour déterminer si la prise en compte de la biodisponibilité des nutriments pourrait avoir une influence sur la composition, en particulier en viande, d'une alimentation plus durable. Deux régimes aussi proches que possible du régime moyen observé chez les adultes et ayant un impact environnemental réduit d'au moins 30% ont été obtenus : dans le premier modèle (NE), le respect des apports nutritionnels recommandés était imposé pour tous les nutriments; dans le deuxième modèle (NEB), l'adéquation nutritionnelle a été mieux assurée en prenant en compte la biodisponibilité du fer, du zinc, des protéines et de la vitamine A. La quantité totale de viande, égale à 110g/j et à 168g/j dans le régime moyen observé chez les femmes et les hommes respectivement, a diminué de 78% et 67% pour les femmes, et de 68% et 66% pour les hommes, dans les régimes NE et NEB, respectivement. La quantité de viande de ruminant, égale à 36g/j et 54g/j dans le régime moyen observé chez les femmes et les hommes respectivement, a encore plus sévèrement diminué de 84% et 87% pour les femmes, et de 80% et 78% pour les hommes, dans les régimes NE et NEB, respectivement. La part des protéines d'origine animale a diminué dans les deux régimes modélisés, passant d'environ 66% dans les régimes observés à un peu plus de 50% dans les régimes alimentaires modélisés. Il est donc nécessaire de réduire la consommation de viande des adultes français pour tendre vers une alimentation plus durable, et la prise en compte de la biodisponibilité des nutriments ne semble pas remettre en cause cette conclusion.

Mots clés

Alimentation durable, qualité nutritionnelle, impact environnemental, coût de l'alimentation; produits animaux

Abstract

Current public health and environmental issues require identifying dietary changes that both improve nutritional quality and reduce the environmental impact of our diet. A diet optimization approach has been used to assess whether taking into account the bioavailability of nutrients would influence the composition, especially in meat, of more sustainable diets. Two diets as close as possible to the average diet observed in adults and with a reduced environmental impact of at least 30% were obtained: in the first model (NE), compliance with the recommended dietary intakes was imposed for all nutrients; in the second model (NEB), nutritional adequacy was further ensured by taking into account the bioavailability of iron, zinc, protein and vitamin A. Starting from 110g/d in women's OBS diet (168g/d for men), total meat quantity decreased by 78% and 67% for women (68% and 66% for men) in NE and NEB diets, respectively. Starting from 36g/d women's OBS diet (54g/d for men), ruminant meat quantity dropped severely by 84% and 87% in NE and NEB diets for women (80% and 78% for men). The share of protein of animal origin decreased in the 2 modeled diets, from about 66% in the diets observed to slightly more than 50% in modeled diets. Reducing meat consumption of French adults is thus a necessity to improve diet sustainability, and taking into account nutrient bioavailability does not modify this conclusion.

Keywords: Sustainable diet, diet quality, environmental impact, diet cost, animal-based products

Introduction

La FAO définit les régimes alimentaires durables comme des régimes «à faible impact environnemental [...], protecteurs et respectueux de la biodiversité et des écosystèmes, culturellement acceptables, physiquement accessibles, économiquement justes et financièrement abordables; nutritionnellement adéquats, sûrs et sains "[1]. Les émissions de gaz à effet de serre (EGES) provenant du secteur agricole représentent environ 30% des émissions mondiales, dont une grande partie provient du secteur de l'élevage [2]. L'adoption d'une alimentation moins carnée a été identifiée comme un moyen potentiellement efficace de réduire à la fois l'impact environnemental et les maladies chroniques liées à l'alimentation [3,4]. Cependant, les différentes dimensions de la durabilité de l'alimentation (nutrition/santé, environnement, culture et économie) ne sont pas nécessairement compatibles entre elles. Par rapport aux régimes actuellement consommés, une alimentation plus saine et plus respectueuse de l'environnement peut être moins abordable financièrement [5,6], et l'acceptabilité des régimes végétariens est limitée [7].

L'approche de modélisation de rations alimentaires par programmation linéaire ou non linéaire permet de concevoir des diètes qui respectent un ensemble de contraintes (sur les aliments, les nutriments, le coût, les EGES...) tout en optimisant une fonction (le coût total de la diète, les calories, l'écart avec une ration existante...). C'est donc un outil idéal pour considérer simultanément plusieurs dimensions de la durabilité du régime alimentaire [8–12]. Appliquée au contexte français, cette approche a montré que réduire les EGES d'origine alimentaire (jusqu'à -30%) tout en respectant l'ensemble des recommandations nutritionnelles était réalisable par la réduction de la consommation de viande associée à d'autres changements alimentaires modérés, sans modifier le coût de la diète [9].

Les apports nutritionnels conseillés (ANC) sont fondés sur les besoins nutritionnels estimés et la biodisponibilité moyenne des nutriments, compte tenu des habitudes alimentaires de la population [13]. Cependant, la biodisponibilité des nutriments, définie comme la proportion d'un nutriment ingéré qui est absorbée et utilisée par les voies métaboliques, dépend de facteurs liés à l'hôte (par exemple, l'état nutritionnel) et à certaines caractéristiques de son alimentation (par exemple la teneur en phytates) [14], et elle peut être plus faible pour certains nutriments quand ils proviennent de produits d'origine végétale

plutôt qu'animale [15]. Par conséquent, des régimes plus végétaux pourraient s'avérer être moins en mesure de satisfaire aux besoins physiologiques même si la quantité totale de nutriment ingérée est élevée [16]. A ce jour, il existe des algorithmes permettant d'estimer la biodisponibilité du fer, du zinc, des protéines, des folates et de la vitamine A, en prenant en compte la quantité et la forme du nutriment, la présence d'inhibiteurs et d'activateurs d'absorption dans la ration alimentaire, et lorsque nécessaire le statut nutritionnel de l'individu [14].

Plusieurs études ont évalué l'impact environnemental de régimes alimentaires réels et modélisés pour identifier les changements alimentaires qui aideraient à réduire l'impact environnemental de l'alimentation [17,18]. Cependant, à notre connaissance, aucune de ces études n'a pris en compte les variations de biodisponibilité induites par les changements alimentaires, compromettant potentiellement l'adéquation nutritionnelle des régimes recommandés et donc leur durabilité.

En utilisant une approche d'optimisation de rations par programmation linéaire et non linéaire, la présente étude visait à évaluer l'impact de la prise en compte de la biodisponibilité de nutriments clés (fer, zinc, protéines et vitamine A) sur les changements alimentaires nécessaires pour améliorer la durabilité du régime alimentaire français.

Méthodes

Population et données alimentaires

Nous avons utilisé les données de consommations alimentaires des adultes (≥ 18 ans) normodéclarants inclus dans la deuxième *Etude Individuelle Nationale Française des Consommations Alimentaires* (INCA2) [19], soit 773 hommes et 1126 femmes âgés de $49,0 \pm 15,1$ et $45,8 \pm 15,3$ ans, respectivement. La base de données sur la composition des aliments CIQUAL (Centre d'information français sur la qualité des aliments) associée à l'enquête INCA2 a fourni la teneur en nutriments de tous les aliments déclarés comme consommés. Pour tenir compte de la biodisponibilité, d'autres nutriments (provitamines A, acides aminés) ainsi que des données sur les modulateurs de biodisponibilité (phytates, fer héminique, polyphénols des boissons) ont été ajoutés à la table, tel que décrit précédemment [20,21].

Estimation de la biodisponibilité de nutriments clés

Il existe cinq nutriments dont la biodisponibilité peut être estimée par un algorithme : fer, zinc, protéines, vitamine A et folates [14]. Seule la biodisponibilité des folates n'a pas été estimée dans la présente étude car l'algorithme consiste à distinguer l'acide folique naturellement présent dans les aliments vs. issu des aliments fortifiés, dont l'augmentation n'était pas autorisée dans les modèles d'optimisation. La biodisponibilité, telle qu'abordée dans cette étude, fait référence au taux d'absorption dans le cas du fer et du zinc, à la bio-efficacité (prenant en compte l'absorption et la conversion [22]) pour les caroténoïdes provitaminiques A, et à la qualité (prenant en compte la digestibilité et la valeur biologique) pour les protéines. La biodisponibilité a été estimée comme décrit précédemment par Perignon *et al.* [20] en utilisant des algorithmes et des coefficients issus de la littérature. L'absorption de fer non hémérique (%) a été estimée en utilisant l'algorithme de Armah *et al.* [23] qui prend en compte le statut nutritionnel et les quantités de vitamine C, phytates, viande/poisson, polyphénols (en équivalent tasse de thé), et fer non-hémérique dans la ration alimentaire, l'absorption du fer hémérique (%) a été estimée en utilisant l'équation de Hallberg et al. [24] et la quantité totale de fer absorbée a été estimée par la somme des quantités de fer non-hémérique et hémérique absorbées. La quantité de zinc absorbée a été calculée en utilisant l'algorithme de Miller et al. [25] qui prend en compte les quantités de phytates et de zinc dans la ration alimentaire. Comme décrit précédemment [20], les quantités en équivalents rétinol (ER) de trois caroténoïdes provitaminiques A (β -carotène, α -carotène et β -cryptoxanthine) ont été calculées en utilisant des facteurs de conversion spécifiques à un aliment ou à un groupe d'aliments issus de la littérature. La qualité des protéines a été estimée par le Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score (PDCAAS, en%) [26], en appliquant différentes valeurs de digestibilité selon la source alimentaire [26,27].

Impact environnemental des aliments

L'impact environnemental a été estimé pour 402 aliments incluant 391 aliments précédemment identifiés comme les plus consommés par la population française [28], et 11 aliments ayant potentiellement un intérêt nutritionnel et/ou environnemental (ex: produits à base de soja, flocons d'avoine, châtaignes).

Trois impacts environnementaux ont été estimés: les émissions de gaz à effet de serre : EGES (en

équivalents dioxyde de carbone, CO₂eq), l'acidification de l'air (en équivalents dioxyde de soufre, SO₂eq) et l'eutrophisation marine (en équivalents azote, Neq). Les valeurs de ces impacts ont été estimées avec une méthode hybride précédemment décrite par Bertoluci *et al.*[29].

Agrégation des données nutritionnelles

Au total, 1342 aliments ont été déclarés comme consommés par les participants adultes à l'étude INCA2, mais les données environnementales n'étaient disponibles que pour 402 aliments (voir § ci-dessus). Les consommations alimentaires ont donc été reportées sur ces 402 aliments selon une méthode précédemment décrite [9]. La consommation moyenne observée (régimes OBS) a été calculée à partir des consommations individuelles reportées sur les 402 aliments. Les apports énergétiques et nutritionnels ont été calculés en croisant les quantités des 402 aliments (après report des quantités des autres aliments) avec leur composition nutritionnelle, séparément pour les hommes et les femmes.

Coût du régime

Les prix moyens de chacun des 402 aliments ont été extraits des données d'achats alimentaires d'un échantillon représentatif de 12 000 ménages français participant au panel Kantar Worldpanel en 2006 [30], en divisant, pour chaque aliment acheté, la totalité des dépenses annuelles des ménages par la totalité des quantités achetées, comme décrit précédemment [31].

Optimisation des consommations alimentaires par programmation linéaire et non linéaire

Une approche d'optimisation des consommations alimentaires par programmation linéaire et non linéaire a été utilisée. Le régime moyen observé dans la population adulte française a été considéré comme un indicateur d'un régime culturellement acceptable, et par conséquent, l'écart avec ce régime observé a été minimisé dans les régimes modélisés. Pour chaque sexe, deux régimes optimisés ont été modélisés en imposant une réduction d'au moins 30% de chacun des impacts environnementaux considérés (EGES, eutrophisation et acidification), tout en s'éloignant le moins possible de la composition du régime moyen observé afin de respecter au mieux les habitudes alimentaires françaises, et sous différents niveaux de contraintes:

- i) dans le modèle NE (Nutrition-Environnement), l'atteinte des recommandations nutritionnelles a été imposée pour tous les nutriments;
- ii) dans le modèle NEB (NE-Biodisponibilité), en plus du respect des recommandations nutritionnelles imposé comme dans le modèle précédent, la variabilité de la biodisponibilité du fer, du zinc, des protéines et de la vitamine A a été prise en compte (voir § Estimation de la biodisponibilité de nutriments clés) de manière à mieux garantir l'adéquation nutritionnelle des régimes modélisés.

Contraintes environnementales

Une étude précédente de Perignon *et al.* [9] a montré que les EGES liées à l'alimentation en France pouvaient être diminuées de 30% tout en respectant l'ensemble des recommandations nutritionnelles sans nécessiter des changements alimentaires majeurs autres que ceux déjà induits par le respect des recommandations, et pour un coût similaire à l'observé. Par contre, des réductions plus importantes d'EGES (> 30%) avaient soit altéré la qualité nutritionnelle (en l'absence de contraintes nutritionnelles), soit nécessité des écarts aux consommations alimentaires actuelles nettement plus importants, compromettant ainsi l'acceptabilité culturelle des régimes modélisés. Compte tenu de ces précédents résultats, une réduction de 30% des EGES a été choisie comme objectif pour la présente étude. Les indicateurs d'eutrophisation et d'acidification ayant été décrits comme très corrélés aux EGES, une réduction de 30% leur a également été imposée [32].

Contraintes nutritionnelles

La qualité nutritionnelle des régimes modélisés a été assurée en imposant un ensemble de contraintes sur les teneurs en macronutriments, acides gras (n=5), minéraux (n=10), vitamines (n=11), sucres libres, cholestérol et fibres (voir tableau 1 de l'annexe disponible dans la version en ligne), principalement basées sur les Apports Nutritionnels Conseillés (ANC) français. Les teneurs énergétiques des régimes modélisés ont été fixées égales aux apports observés (1937 kcal et 2602 kcal pour les femmes et les hommes, respectivement).

Les contraintes nutritionnelles différaient entre les modèles NE et NEB pour les quatre nutriments clés. Ainsi, dans le modèle NE, le respect des ANC était imposé sur la quantité totale de nutriment, mais sans garantie sur la couverture effective des besoins (la variabilité de la biodisponibilité liée à la composition du régime n'étant pas prise en compte). Dans le modèle intégrant la biodisponibilité (NEB), les contraintes sur le fer et le zinc n'étaient pas fixées sur l'apport total mais sur les quantités disponibles pour l'absorption, elles-mêmes estimées avec les équations citées plus haut (voir § 'Estimation de la biodisponibilité de nutriments clés'). Dans ce modèle, les quantités de fer et de zinc disponibles pour l'absorption ont été contraintes de respecter le niveau des besoins physiologiques en ces nutriments, eux-mêmes estimés en multipliant la valeur d'ANC par la biodisponibilité moyenne considérée par l'ANSES pour définir cet ANC (soit 10% pour le fer et 25% pour le zinc [13]).

Pour les protéines et la vitamine A, le respect de l'ANC était imposé dans tous les modèles, mais pour le modèle NEB, les teneurs estimées en protéines et en vitamine A (exprimée en rétinol) étaient respectivement corrigées par le PDCAAS et les facteurs de conversion spécifiques à leur source alimentaire (voir § Estimation de la biodisponibilité de nutriments clés).

Contraintes d'acceptabilité culturelle

Pour éviter des écarts trop importants avec les régimes observés, les quantités de chaque aliment et de chaque sous-groupe et groupe d'aliments ont été contraintes de rester inférieures au 90^{ème} percentile des apports observés, estimé pour chaque sexe séparément [33]. La quantité totale des régimes modélisés (en g/j) était contrainte à 80-120% des quantités observées. Les quantités d'aliments fortifiés, de boissons alcoolisées et d'eaux minérales ont été contraintes à ne pas dépasser les quantités observées.

Contrainte de coût

Le coût total de chaque régime alimentaire modélisé a été contraint à rester inférieur ou égal au coût du régime alimentaire observé.

Variables de décision

Les variables de décision (c'est-à-dire les variables dont la valeur peut être modifiée lors du processus d'optimisation) sont les quantités des 402 aliments sur lesquels ont été reportées les quantités

consommées de tous les aliments déclarés dans l'enquête INCA2 (voir le § 'Agrégation des données nutritionnelles').

Fonction objectif

Pour chaque sexe, la fonction objectif f exprime l'écart par rapport au régime alimentaire moyen observé au niveau des aliments ($n = 402$ aliments) et au niveau des groupes alimentaires ($n = 8$ groupes). En minimisant cette fonction objectif, nous avons encouragé à la fois les quantités des groupes d'aliments (par exemple les produits laitiers) et des aliments (par exemple mozzarella) à rester aussi proches que possible des quantités observées, comme décrit précédemment [34].

Analyse des données

Par rapport au régime moyen observée (OBS), les changements induits par les 2 modèles en termes de quantités d'aliments ($n = 402$), de sous-groupes ($n = 27$) et groupes d'aliments ($n = 8$) ont été analysés pour chaque sexe séparément. Le logiciel SAS version 9.4 a été utilisé pour toutes les modélisations (procédure *optmodel*).

Résultats

Composition des régimes alimentaires

Les parts de l'énergie et des protéines d'origine animale ont diminué dans les 2 régimes modélisés, passant respectivement d'environ 34% et 68% dans les régimes OBS à environ 20% et 50% dans les régimes modélisés (Figure 1).

Dans les régimes NE, les quantités de « Viande-poisson-œufs » ont diminué (d'environ 40% pour les deux sexes), tandis que celles de « Fruits et légumes » et de « Féculents » ont augmenté par rapport aux régimes OBS (Figure 2). Pour les sous-groupes d'aliments, les augmentations les plus importantes dans les régimes NE par rapport aux régimes OBS concernaient les sous-groupes « Lait », « Fruits frais », « Plats à base de légumes » et « Pommes de terre », et les plus fortes baisses concernaient les « Boissons chaudes », « Charcuterie », « Viande de ruminant » et « Graisses animales » (Figure 3). Par rapport aux

régimes OBS, la quantité totale de viande (incluant la viande contenue dans les plats composés à base de produits animaux) a chuté de 78% et 68%, chez les femmes et chez les hommes respectivement, correspondant à 25 g/j et à 54 g/j dans les régimes NE au lieu de 110 g/j et 168 g/j dans les régimes OBS des femmes et des hommes, respectivement (Tableau 1). Concernant plus spécifiquement la viande de ruminants, elle a chuté de 84% et 80%, correspondant à 6g j et à 11g/j de viande de ruminant dans les régimes NE des femmes et des hommes, respectivement (au lieu de 36g/j et 54g/j dans les régimes OBS des femmes et des hommes, respectivement).

Dans les régimes NEB, la prise en compte de la variabilité de la biodisponibilité des quatre nutriments clés n'a pas induit de changements majeurs de la composition alimentaire par rapport aux régimes NE. Entre les régimes NEB et NE, les quantités ne s'écartaient pas de plus de 9% pour les groupes d'aliments (Figure 2) et de 25% pour les sous-groupes d'aliments (Figure 3). La seule exception concerne le sous-groupe « Charcuterie », qui a augmenté de 358% dans le régime NEB par rapport au régime NE (correspondant principalement à une augmentation de 11 g/j de boudin noir). Par rapport aux régimes OBS, la quantité totale de viande a baissé de 67% et 66%, aboutissant à 36 g/j et à 58 g/j dans les régimes NEB des femmes et des hommes, respectivement (Tableau 1). La quantité totale de viande de ruminants a quant à elle diminué de 87% et de 78%, aboutissant à 5 g/j et à 12 g/j dans les régimes NEB des femmes et des hommes, respectivement.

Coût des régimes

Les coûts des régimes OBS, NE et NEB étaient de 6,2 €/j, 5,9 €/j, et 5,8 €/j pour les femmes et 8,1 €/j, 6,9 €/j, et 6,9 €/j pour les hommes, respectivement. Quel que soit le modèle appliqué, les régimes modélisés coûtaient donc moins cher que les régimes OBS.

Estimations de la biodisponibilité

Comparé au régime OBS des femmes, les régimes modélisés avaient des teneurs en fer total plus élevées (Tableau 1). Cependant, comparativement au régime OBS, la biodisponibilité du fer était plus faible dans le régime NE et égale ou supérieure dans le régime NEB. La teneur en fer héminique était plus importante dans le régime NEB que dans les régimes OBS. Au total 26%, 18% et 88% du fer héminique provenait du boudin noir et 34%, 19%, et 3% provenait de la viande de ruminant dans les régimes OBS,

NE et NEB, respectivement. Pour les hommes et les femmes, les teneurs en phytates étaient plus élevées dans les régimes modélisés que dans les régimes OBS, et plus élevées dans les régimes NE que dans le régime NEB. Le fer était particulièrement limitant dans les régimes des femmes : en effet, dans les régimes NE, le fer disponible pour l'absorption atteignait seulement 46,3% du besoin en fer absorbable alors que l'apport total atteignait 100% de l'ANC. Les contraintes sur les protéines et la provitamine A n'étaient jamais limitantes, chez les hommes comme chez les femmes (Tableau 1) : en effet, les teneurs en protéines corrigées par le PDCAAS et en vitamine A estimée avec des coefficients spécifiques par groupe d'aliments pour la conversion des caroténoïdes provitaminiques A étaient déjà supérieures à 100% de l'ANC dans les régimes NE.

Contributions des sous-groupes alimentaires aux impacts environnementaux

Le détail des contributions des sous-groupes d'aliments aux impacts environnementaux (EGES, eutrophisation et acidification) des régimes observés et modélisés est fourni dans la version anglaise de l'article [34].

Le sous-groupe « Viande de ruminants » était le principal contributeur des EGES des régimes observés; sa contribution a diminué dans les régimes NE et NEB. Le groupe « Porc-volaille-œufs » était le principal contributeur de l'eutrophisation du régime OBS (24-26%), et contribuait à hauteur de 16-17% de l'eutrophisation des régimes modélisés NE et NEB. Le niveau d'acidification des régimes optimisés était réduit de plus de 30%, soit plus que la contrainte imposée, ce qui indiquait que cet indicateur n'était pas un levier des changements alimentaires induits par l'optimisation.

Discussion

À notre connaissance, cette étude est la première à avoir pris en compte de façon quantitative la variabilité de la biodisponibilité des nutriments liée à la composition du régime lors de la conception de régimes alimentaires plus durables.

Réduire l'impact environnemental des régimes alimentaires d'au moins 30% tout en respectant les recommandations nutritionnelles (modèle NE) a nécessité une augmentation des quantités de fruits et

légumes et de féculents, et une réduction importante de la quantité totale de viande (réduction d'environ 70%), et en particulier de viande de ruminants (réduction d'environ 70-80%).

La prise en compte de la variabilité de la biodisponibilité des principaux nutriments (modèle NEB) n'a pas modifié la nécessité de réduire les quantités totales de viande ni de viande de ruminants, mais des substitutions entre aliments ont eu lieu, y compris au sein du groupe viande, afin de répondre aux besoins en fer absorbable chez les femmes (notamment augmentation des quantités de boudin noir, aliment riche en fer héminique).

Plusieurs études ont évalué l'impact environnemental des régimes observés ou recommandés [64-67]. Cependant, les scénarios testés dans ces études étaient basés sur des décisions a priori quant aux changements alimentaires, négligeant ainsi l'acceptabilité culturelle, une dimension pourtant importante de la durabilité de l'alimentation. L'optimisation du régime alimentaire par programmation linéaire (et non linéaire) est un outil particulièrement adapté pour identifier des régimes adéquats d'un point de vue nutritionnel tout en étant respectueux de l'environnement, et aussi proches que possible des choix alimentaires réels des personnes. Partant d'aliments couramment consommés au Royaume-Uni, Mac Diarmid *et al.* ont utilisé la programmation linéaire pour modéliser un régime respectant un ensemble de recommandations nutritionnelles tout en réduisant les EGES de 36% [8]. Par rapport au régime moyen observé chez les femmes, le régime modélisé contenait plus de fruits et légumes et de féculents et moins d'aliments gras et/ou sucrés et moins de viande : la quantité totale de viande dans le régime modélisé représentait 60% de l'apport actuel, et 48% pour la viande rouge. Aux Pays-Bas, van Dooren *et al.* ont également utilisé la programmation linéaire pour simuler le respect d'un ensemble de contraintes nutritionnelles associé à une réduction de 50% des EGES : le régime modélisé était presque végétarien et moins cher que le régime moyen observé [11]. En France, en nous basant sur les mêmes données de consommations alimentaires que dans la présente étude, nous avons précédemment montré qu'il est possible de modéliser des régimes avec une réduction de 30% des EGES tout en respectant les recommandations nutritionnelles sans coût additionnel [9]. Le régime modélisé contenait plus de fruits et légumes et de féculents et moins de viande (environ 75% de réduction de la viande de ruminants et de la charcuterie) que le régime moyen observé. Ainsi, la conclusion commune de ces études est qu'il est nécessaire de réduire la viande, en particulier la viande des ruminants, afin d'améliorer la durabilité

du régime alimentaire. Cependant, une telle conclusion pourrait être remise en question par certaines limites des modèles utilisés dans les études décrites ci-dessus, notamment : la possibilité d'introduire des aliments enrichis dans les régimes optimisés [9], la prise en compte d'un seul indicateur environnemental [8–10], d'un nombre limité d'aliments [8,10], d'un nombre limité de contraintes nutritionnelles [10], ainsi que la non prise en compte de la variabilité de la biodisponibilité des nutriments clés [8–11]. Nous avons donc mené la présente étude pour dépasser ces limites et évaluer si la conclusion sur la nécessité de réduire la viande pour améliorer la durabilité du régime resterait valable.

Les changements alimentaires induits par la prise en compte de la biodisponibilité dans les modèles sont principalement expliqués par la nécessité de satisfaire les besoins en fer pour les femmes. Étant donné que la teneur en fer du régime observé était très inférieure aux besoins en fer des femmes, l'augmentation de la quantité de boudin noir dans le régime NEB était clairement liée au besoin en fer héminique, plus facilement absorbé que le fer non héminique. Dans le régime NEB, non seulement la quantité de fer héminique a augmenté, mais l'absorption du fer non héminique a également été favorisée par l'amélioration de l'équilibre entre activateurs et inhibiteurs de l'absorption du fer non héminique (par exemple, les phytates, inhibiteurs de l'absorption du fer, ont été réduits dans le régime NEB par rapport au régime NE). Par ailleurs, contrairement à des propositions récentes d'augmenter de façon considérable les consommations de légumes secs et de fruits oléagineux [35,36], ce n'est la voie qui a été choisie par les modèles, puisque les régimes proposés contiennent exactement les mêmes quantités (faibles au demeurant) de fruits oléagineux et de légumineuses que dans les régimes moyens observés.

Les modèles visent à respecter toutes les contraintes nutritionnelles et environnementales imposées en s'écartant le moins possible du régime observé, ce qui signifie qu'ils tendent à rester à la consommation observée tant que c'est possible. La stabilité des légumineuses et des fruits oléagineux indique donc qu'ils ne procurent pas un avantage suffisamment important en termes d'apports nutritionnels et/ou d'impact environnemental pour que leur quantité soit augmentée. La situation est opposée pour le boudin, dont la quantité est considérablement augmentée alors qu'il est au départ peu consommé.

La quantité de fruits et légumes obtenue dans les régimes optimisés est de l'ordre de 500g/j, soit environ 6 portions par jour. La quantité de poissons des régimes optimisés est quant à elle de l'ordre de

210g/semaine, ce qui est en accord avec les recommandations actuelles de 2 portions/semaine [36]. La quantité totale de viande est de 175g et 250g par semaine chez les femmes (380g et 400g chez les hommes) dans les régimes NE et NEB respectivement, ce qui est inférieur à la limite maximale de 500g/semaine fixée pour la seule viande rouge.

En accord avec des résultats précédemment obtenus par notre équipe [20], la présente étude suggère donc que l'alimentation française est suffisamment diversifiée pour assurer quantitativement et qualitativement les besoins en zinc, protéines et vitamine A, même lorsque les quantités de produits animaux sont faibles.

Cette étude met également en évidence le sous-groupe alimentaire « Porc-volaille-œufs » comme vecteur majeur de l'eutrophisation des régimes. Par conséquent, favoriser la viande d'animaux monogastriques en remplaçant la viande de bœuf par de la viande de porc ou de volaille, comme le proposent certaines études [37,38], pourrait induire une augmentation des niveaux d'eutrophisation, malgré un impact bénéfique sur les EGES. De plus, cette étude met en évidence que le coût des régimes optimisés est plus faible que le coût observé. Ce résultat peut s'expliquer par la diminution de la viande qui est un groupe alimentaire cher par rapport aux autres groupes d'aliments [39].

Malgré l'apport de connaissances nouvelles, cette étude comporte des limites. Il serait intéressant d'étudier d'autres impacts environnementaux, tels que l'empreinte eau, l'utilisation des terres ou la biodiversité, puisque différents indicateurs environnementaux n'évoluent pas toujours dans le même sens [40]. Cependant, une étude ayant minimisé différents indicateurs d'impact environnemental (émissions de gaz à effet de serre, azote, eau et utilisation des terres) sous contraintes nutritionnelles a conduit à des régimes relativement similaires à ceux que nous avons obtenus [41]. L'optimisation mathématique elle-même présente des limites, explicitées dans une récente revue de la littérature [12]. Par exemple, en prenant comme point de départ le régime alimentaire français moyen, nous n'avons pas tenu compte de la variabilité inter-individuelle des consommations alimentaires. Ainsi, pour chaque modèle, un seul régime a été modélisé pour les hommes et un seul pour les femmes, empêchant la réalisation de tests statistiques. Le développement de régimes optimisés au niveau individuel, basés sur

les consommations alimentaires et les besoins nutritionnels de chaque individu aiderait à identifier de façon plus robuste des stratégies d'atteinte des objectifs de durabilité [42]. Les recommandations nutritionnelles respectées par les modèles concernent les adultes sains, hors condition physiopathologique particulière, et les quantités d'aliments présents dans les régimes modélisés sont dans les fourchettes des quantités consommées de ces aliments dans la population. On pourrait donc en déduire que les régimes modélisés présentés ici sont applicables à la population adulte générale. Cependant, il faut bien noter que les régimes optimisés restent théoriques et manquent souvent de réalisme. En particulier, dans la présente étude, la forte baisse de la quantité de viande n'est sans doute pas actuellement acceptable par la grande majorité de la population même si le flexitarisme tend à se développer, y compris en France [43]. Il peut aussi sembler très fragile de faire reposer l'adéquation des apports aux besoins en fer sur la consommation d'un aliment aussi particulier que le boudin noir qui est peu consommé, comme la plupart des abats (il y a 92% de non-consommateurs d'abats d'après la dernière étude sur les consommations alimentaires des adultes en France, INCA3 [44]). De plus, il faut élever des porcs pour faire du boudin, de même qu'il faut élever des vaches pour faire du lait. Dans une troisième modélisation, non relatée ici mais présentée dans la version anglaise de l'article (modèle NEB-CP) [34], nous avons introduit des liens de « co-production » entre viande de porc et boudin et entre viande bovine et protéines laitières, de façon à veiller à ce que l'un ne puisse augmenter que si l'autre augmentait aussi. Avec ces nouvelles contraintes, la viande baissait quand même mais de façon moins marquée, notamment pour les femmes : réduction de 32% (au lieu de 67% dans le modèle NEB) pour la quantité totale de viande, et de 27% (au lieu de 87% dans le modèle NEB) pour la viande de ruminant. De plus, dans ce régime NEB-CP, le fer héminique continuait à être apporté par le boudin noir à hauteur de 54% (au lieu de 88% dans le régime NEB). Une autre limite porte sur la dimension environnementale de l'étude. Les estimations des indicateurs environnementaux étaient des valeurs moyennes représentatives de la situation française actuelle en termes de production, de procédés de transformation et de modes de distribution, et n'ont donc pas permis d'évaluer la variabilité des impacts environnementaux en fonction de ces caractéristiques. Notamment, l'étude ne permet pas de se prononcer sur le rôle du Bio dans une alimentation plus durable. Une limite affecte aussi la dimension économique de l'étude. En effet, l'estimation du coût de l'alimentation était basée sur les prix moyens

des aliments à un instant t, sans tenir compte du fait que les changements dans les habitudes alimentaires modifieraient la demande, et donc les prix des aliments. De même, nous avons considéré que les impacts environnementaux de chaque aliment étaient constants, bien que les changements dans la demande alimentaire puissent également avoir un impact sur les chaînes de production alimentaire, susceptibles de modifier les impacts environnementaux des aliments. L'évaluation de la biodisponibilité pourrait également être améliorée. Par exemple, la caséine n'a pas été incluse dans l'algorithme utilisé dans la présente étude, bien qu'elle puisse inhiber l'absorption du fer [45]. En outre, la biodisponibilité du calcium n'a pas été considérée ici, car, à notre connaissance, aucun algorithme n'a encore été développé pour prédire l'absorption du calcium à partir des données de consommations alimentaires. Enfin, les modèles d'optimisation n'ont été développés qu'à partir de 402 aliments contre 1342 déclarés comme consommés par la population française dans l'étude INCA2. Néanmoins, les 402 aliments utilisés incluaient 391 aliments identifiés comme les plus consommés par la population française, et les quantités des autres aliments ont été reportées sur les 402 aliments.

La présente étude propose des régimes théoriques nutritionnellement adéquats à impact environnemental réduit, respectant les habitudes alimentaires des adultes français, et prenant en compte la biodisponibilité de quatre nutriments clés. Pour atteindre une alimentation plus durable, la part des protéines d'origine animale, égale à 66% en moyenne actuellement, devrait être réduite à 50% environ, sans que la viande soit pour autant supprimée. Il est donc nécessaire de réduire la consommation de viande des adultes français pour tendre vers une alimentation plus durable, et la prise en compte de la biodisponibilité des nutriments ne semble pas remettre en cause cette conclusion.

Tableau

Tableau 1. Estimations de la biodisponibilité et des teneurs en nutriments et en modulateurs de biodisponibilité dans le régime alimentaire observé (OBS) et les deux régimes modélisés (NE, NEB) par sexe. NE : modèle nutrition-environnement ; NEB : modèle NE-biodisponibilité ; OBS : observé. PDCAAS, protein digestibility-corrected amino acid score ; ANC, Apports Nutritionnels Conseillés.

	Femmes			Hommes		
	OBS	NE	NEB	OBS	NE	NEB
Estimations de la biodisponibilité						
Taux d'absorption du fer (%)	7.7	4.6	9.1	7.6	4.7	5.1
Taux d'absorption du zinc (%)	30.7	25.7	27.0	25.9	24.0	23.9
Digestibilité des protéines (%)	95.0	95.0	95.1	95.0	95.1	95.1
Amino Acid Score	1.3	1.3	1.3	1.3	1.2	1.3
Teneur en nutriments						
Fer total (% ANC)	68.3	100.0	110.5	162.2	197.3	195.5
Fer disponible pour absorption (% ¹)	52.7	46.3	100.0	123.2	92.7	100.0
Zinc total (% ANC)	87.8	100.0	93.9	100.3	100.0	104.6
Zinc disponible pour absorption (% ²)	107.9	102.8	101.4	104.0	96.1	100.0
Protéine totale (% ANC)	142.8	115.7	117.2	159.4	121.0	121.6
Protéine corrigée par PDCAAS (% ANC)	135.6	110.0	111.5	151.4	115.1	115.6
Vitamine A, estimée avec des coefficients de 6 et 12 ³ (% ANC)	178.5	171.5	175.6	159.3	185.3	207.8
Vitamine A, estimée avec des coefficients spécifiques ⁴ (% ANC)	131.5	114.8	113.7	123.6	147.6	169.7
Teneurs en modulateurs de biodisponibilité						
Fer héminique (mg/j)	1.3	0.3	2.2	1.8	0.5	0.8
Phytates (mg/j)	795	1285	1162	1071	1358	1331
Vitamine C (mg/j)	97	110	110	95	110	110
Polyphénols des boissons (en eq. tasse de thé/j)	1.2	0.2	0.0	0.8	0.3	0.3
Calcium (mg/j)	854	900	900	1008	900	900
Viande totale ⁵ et poissons (g/j)	140	54	66	199	85	88
Viande totale ⁵ (g/j)	110	25	36	168	54	58
Viande de ruminant ⁶ (g/j)	36	6	5	54	11	12

¹ % besoin en fer absorbable. ² % besoin en zinc absorbable. ³ Coefficients de 6 et 12 pour la conversion des caroténoïdes provitaminiques A. ⁴ Coefficients spécifiques par groupe d'aliments pour la conversion des caroténoïdes provitaminiques A. ⁵ « Viande totale » inclut tous les types de viande (porc, volaille, viande de ruminant) et la viande présente dans les plats composés. ⁶ « Viande de ruminant » inclut tous les types de viande de ruminant (bœuf, veau, mouton, agneau) et la viande de ruminant présente dans les plats composés.

Figures

Figure 1. Part de l'énergie (A) et des protéines (B) d'origine animale dans l'alimentation observée (OBS) et dans les deux régimes modélisés (NE, NEB) par sexe. NE: modèle nutrition-environnement; NEB: modèle NE-biodisponibilité; OBS : régime moyen observé.

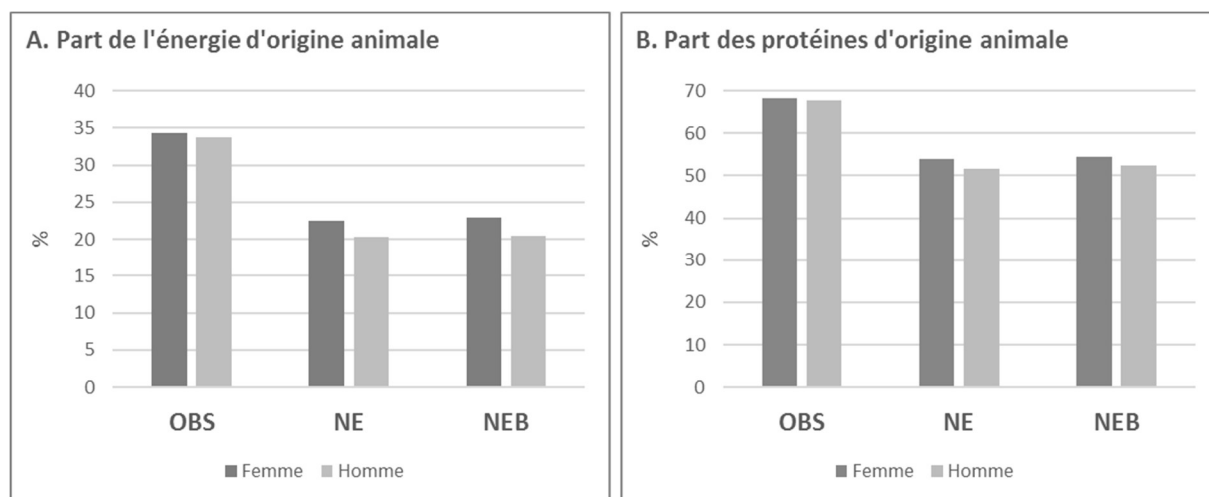


Figure 2. Quantités des groupes d'aliments dans le régime observé (OBS) et dans les deux régimes modélisés. (A) : Aliments solides; (B) : Boissons. F&L : fruits et légumes; AGSS : aliments riches en matières grasses / sucre / sel; VPO : viande-poisson-œufs. NE : modèle nutrition-environnement; NEB : modèle NE-biodisponibilité; OBS : observé.

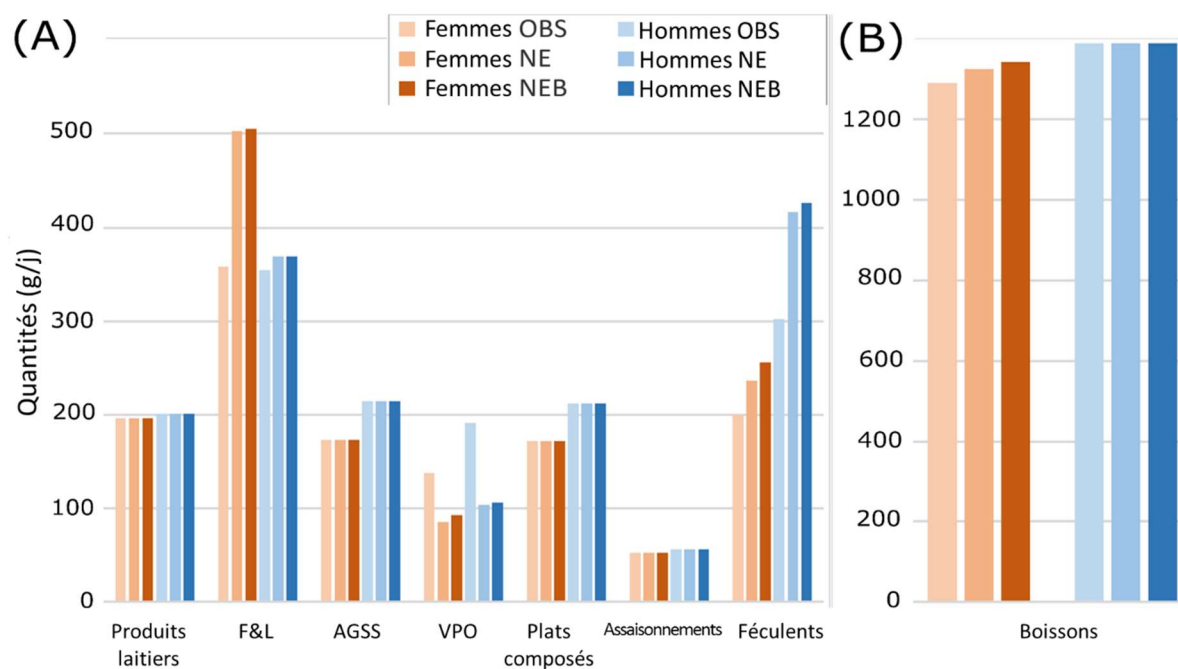
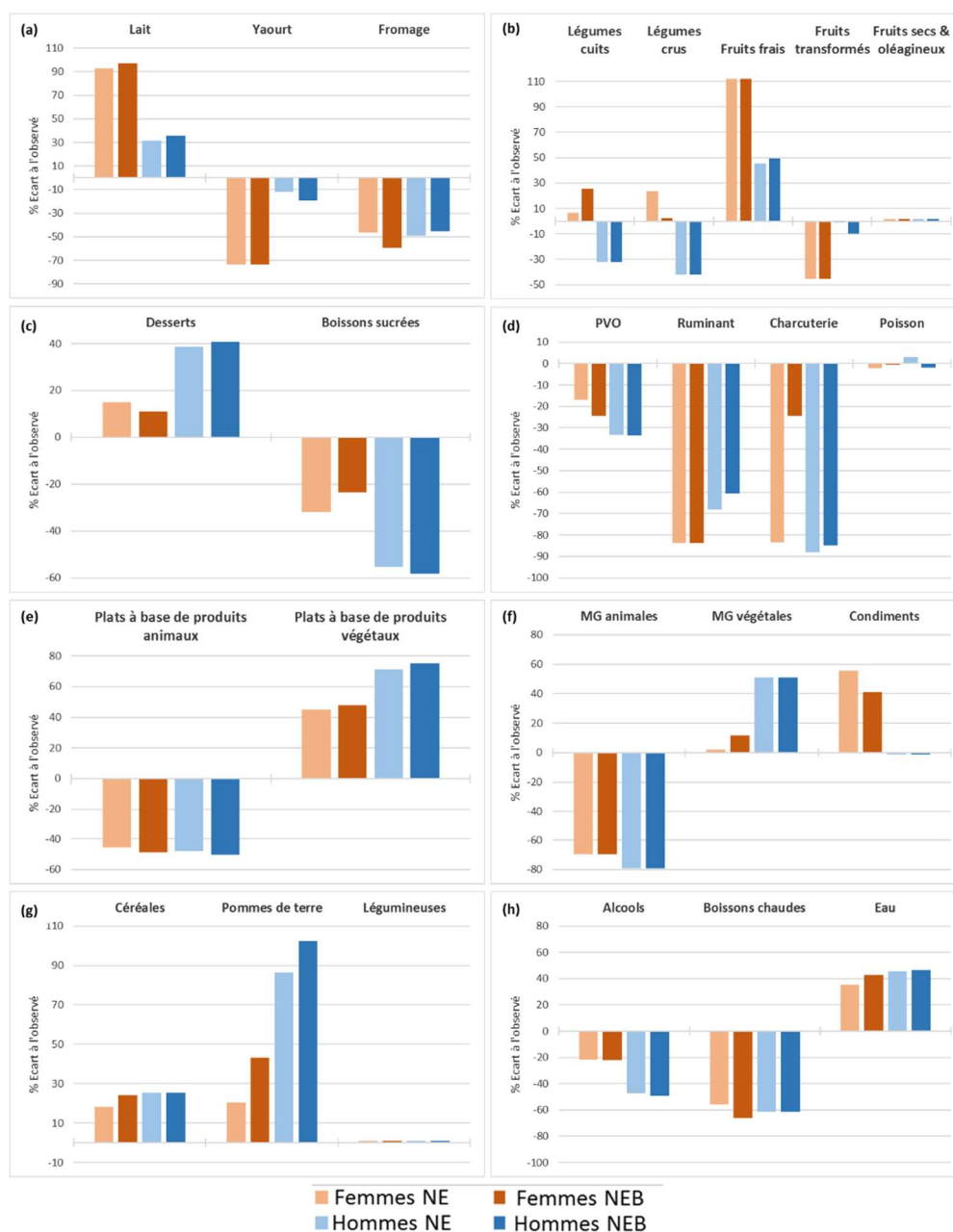


Figure 3. Changements alimentaires induits par les deux modèles (NE, NEB), exprimés en % de variation des quantités des sous-groupes d'aliments entre les régimes modélisés et observés, pour chaque sexe: (a) produits laitiers; b) fruits et légumes; (c) aliments riches en matières grasses/ sucre / sel; d) viande-poisson-œufs; (e) plats composés; (f) assaisonnements; (g) féculents; (h) boissons. Les sous-groupes alimentaires dont les quantités sont inférieures à 6 g dans les régimes OBS et les régimes modélisés (c'est-à-dire les fruits secs, les collations salées et les céréales de petit déjeuner) ne sont pas représentés. NE : modèle nutrition-environnement; NEB : modèle NE-biodisponibilité ; OBS : observé.; MG : matières grasses ; PVO: porc-volaille-œufs.



Déclaration d'intérêt

Les auteurs déclarent ne pas avoir de liens d'intérêts.

Remerciements

TB a reçu un soutien financier de l'école doctorale GAIA de l'Université de Montpellier. MP a reçu un soutien financier de la Fondation Daniel & Nina Carasso dans le cadre du projet Avasun. RG a reçu le soutien financier de MS-Nutrition et de l'ANRT (Association Nationale de la Recherche et de la Technologie). Les bailleurs de fonds n'ont joué aucun rôle dans la conception de l'étude, la collecte et l'analyse des données, la décision de publication ou la préparation du manuscrit.

Références

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Proceedings of the International scientific symposium - Biodiversity and sustainable diets united against hunger. Rome; 2010.
2. Garnett T. Where are the best opportunities for reducing greenhouse gas emissions in the food system (including the food chain)? *Food Policy*. 2011;36: S23–S32.
doi:10.1016/j.foodpol.2010.10.010
3. Tilman D, Clark M. Global diets link environmental sustainability and human health. *Nature*. Nature Publishing Group; 2014;515: 518–522.
doi:http://www.nature.com/nature/journal/v515/n7528/full/nature13959.html
4. Scarborough P, Allender S, Clarke D, Wickramasinghe K, Rayner M. Modelling the health impact of environmentally sustainable dietary scenarios in the UK. *Eur J Clin Nutr*. 2012;66: 710–715. doi:10.1038/ejcn.2012.34
5. Jensen JD, Saxe H, Denver S. Cost-Effectiveness of a New Nordic Diet as a Strategy for Health Promotion. *Int J Environ Res Public Health*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute; 2015;12: 7370–91. doi:10.3390/ijerph120707370

6. Monsivais P, Scarborough P, Lloyd T, Mizdrak A, Luben R, Mulligan AA, et al. Greater accordance with the Dietary Approaches to Stop Hypertension dietary pattern is associated with lower diet-related greenhouse gas production but higher dietary costs in the United Kingdom. *Am J Clin Nutr.* 2015;102: 138–45. doi:10.3945/ajcn.114.090639
7. Macdiarmid JI, Douglas F, Campbell J. Eating like there's no tomorrow: public awareness of the environmental impact of food and reluctance to eating less meat as part of a sustainable diet. *Appetite.* 2015;96: 487–493. doi:10.1016/j.appet.2015.10.011
8. Macdiarmid JI, Kyle J, Horgan GW, Loe J, Fyfe C, Johnstone A, et al. Sustainable diets for the future: can we contribute to reducing greenhouse gas emissions by eating a healthy diet? *Am J Clin Nutr.* 2012;96: 632–639. doi:10.3945/ajcn.112.038729
9. Perignon M, Masset G, Ferrari G, Barré T, Vieux F, Maillot M, et al. 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.* 2016;19: 2662–2674. doi:10.1017/S1368980016000653
10. Green R, Milner J, Dangour AD, Haines A, Chalabi Z, Markandya A, et al. The potential to reduce greenhouse gas emissions in the UK through healthy and realistic dietary change. *Clim Change.* 2015;129: 253–265. doi:10.1007/s10584-015-1329-y
11. van Dooren C, Tyszler M, Kramer G, Aiking H. Combining Low Price, Low Climate Impact and High Nutritional Value in One Shopping Basket through Diet Optimization by Linear Programming. *Sustainability. Multidisciplinary Digital Publishing Institute;* 2015;7: 12837–12855. doi:10.3390/su70912837
12. 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. Oxford University Press;* 2018;9: 602–616. doi:10.1093/advances/nmy049
13. Martin A. Apports nutritionnels conseillés pour la population française. 3ème édition

[Recommended nutritional intakes for the French population]. AFSSA. Paris, France: Lavoisier; 2001.

14. Gibson RS. The role of diet- and host-related factors in nutrient bioavailability and thus in nutrient-based dietary requirement estimates. *Food Nutr Bull.* 2007;28: S77-100. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17521121>
15. Hunt JR. Bioavailability of iron, zinc, and other trace minerals from vegetarian diets. *Am J Clin Nutr.* 2003;78: 633S-639S.
16. Hunt JR. Bioavailability algorithms in setting Recommended Dietary Allowances: lessons from iron, applications to zinc. *J Nutr.* 1996;126: 2345S-2353S.
17. Perignon M, Vieux F, Soler L-G, Masset G, Darmon N. Improving diet sustainability through evolution of food choices: review of epidemiological studies on the environmental impact of diets. *Nutr Rev.* 2017;75: 2–17.
18. Payne CL, Scarborough P, Cobiac L. Do low-carbon-emission diets lead to higher nutritional quality and positive health outcomes? A systematic review of the literature. *Public Health Nutr.* 2016; 1–8. doi:10.1017/S1368980016000495
19. AFSSA. Summary of the Individual and National Study on Food Consumption 2 (INCA2) 2006-2007. Maisons-Alfort; 2009.
20. 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. doi:10.1016/j.foodchem.2016.12.070
21. Gazan R, Barré T, Perignon M, Maillot M, Darmon N, Vieux F. A methodology to compile food metrics related to diet sustainability into a single food database: Application to the French case. *Food Chem.* 2018;238. doi:10.1016/j.foodchem.2016.11.083

22. West CE, Eilander A, van Lieshout M. Consequences of revised estimates of carotenoid bioefficacy for dietary control of vitamin A deficiency in developing countries. *J Nutr.* 2002;132: 2920S-2926S.
23. Armah S, Carriquiry A, Sullivan D. A Complete Diet-Based Algorithm for Predicting Nonheme Iron Absorption in Adults. *J Nutr.* 2013;1: 1136–1140.
doi:10.3945/jn.112.169904.using
24. Hallberg L, Hultén L, Gramatkovski E. Iron absorption from the whole diet in men: how effective is the regulation of iron absorption? *Am J Clin Nutr.* 1997;66: 347–56. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/9250114>
25. Miller L V, Krebs NF, Hambidge KM. A mathematical model of zinc absorption in humans as a function of dietary zinc and phytate. *J Nutr.* 2007;137: 135–141. Available: <http://jn.nutrition.org/content/137/1/135.full.pdf>
26. WHO/FAO/UNU. Protein and amino acid requirements in human nutrition: Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation [Internet]. WHO Technical Report Series 935, editor. World Health Organization; 2007. Available: http://www.who.int/nutrition/publications/nutrientrequirements/WHO_TRS_935/en/
27. Gilani GS, Cockell KA, Sepehr E. Effects of antinutritional factors on protein digestibility and amino acid availability in foods. *J AOAC Int.* 2005;88: 967–987.
28. 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: 569–83. doi:10.3945/ajcn.112.035105
29. Bertoluci G, Masset G, Gomy C, Mottet J, Darmon N. How to Build a Standardized Country-Specific Environmental Food Database for Nutritional Epidemiology Studies. Lightfoot DA, editor. *PLoS One. Public Library of Science*; 2016;11: e0150617.
doi:10.1371/journal.pone.0150617

30. Kantar Worldpanel. Consumer Panels - Kantar Worldpanel [Internet]. 2015.
31. Masset G, Vieux F, Verger EO, Soler LG, 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. doi:10.3945/ajcn.113.077958
32. Masset G, Soler L-G, Vieux F, Darmon N. Identifying Sustainable Foods: The Relationship between Environmental Impact, Nutritional Quality, and Prices of Foods Representative of the French Diet. *J Acad Nutr Diet*. 2014;114: 862–869. doi:10.1016/j.jand.2014.02.002
33. Briend A, Darmon N, Ferguson E, Erhardt JG. Linear programming: a mathematical tool for analyzing and optimizing children’s diets during the complementary feeding period. *J Pediatr Gastroenterol Nutr*. 2003;36: 12–22. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12499991>
34. Barré T, Perignon M, Gazan R, Vieux F, Micard V, Amiot M-J, et al. Integrating nutrient bioavailability and co-production links when identifying sustainable diets: How low should we reduce meat consumption? de Souza RJ, editor. *PLoS One*. Public Library of Science; 2018;13: e0191767. doi:10.1371/journal.pone.0191767
35. Willett W, Rockström J, Loken B, Springmann M, Lang T, Vermeulen S, et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*. Elsevier; 2019;393: 447–492. doi:10.1016/S0140-6736(18)31788-4
36. Haut Conseil de la Santé Publique. Avis relatif à la révision des repères alimentaires pour les adultes du futur Programme national nutrition santé 2017-2021. 2017; 7.
37. Risku-Norja H, Kurppa S, Helenius J. Dietary choices and greenhouse gas emissions – assessment of impact of vegetarian and organic options at national scale. *Prog Ind Ecol An Int J*. 2009;6: 340. doi:10.1504/PIE.2009.032323
38. Saxe H, Larsen TM, Mogensen L. The global warming potential of two healthy Nordic diets compared with the average Danish diet. *Clim Change*. 2013;116: 249–262.

doi:10.1007/s10584-012-0495-4

39. Maillot M, Darmon N, Darmon M, Lafay L, Drewnowski A. Nutrient-dense food groups have high energy costs: An econometric approach to nutrient profiling. *J Nutr.* 2007;137: 1815–1820.
40. Meier T, Christen O. Environmental Impacts of Dietary Recommendations and Dietary Styles: Germany As an Example. *Environ Sci Technol.* 2013;47: 877–888. doi:10.1021/es302152v
41. Gephart JA, Davis KF, Emery KA, Leach AM, Galloway JN, Pace ML. The environmental cost of subsistence: Optimizing diets to minimize footprints. *Sci Total Environ.* Elsevier B.V.; 2016;553: 120–127. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.02.050
42. 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. *Int J Behav Nutr Phys Act.* International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity; 2016;13: 46. doi:10.1186/s12966-016-0370-1
43. Tavoularis G, Sauvage É. Les nouvelles générations transforment la consommation de viande. *CREDOC Consomm modes vie.* 2018; 1–4.
44. ANSES. Étude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 3 (INCA 3) 2017. 2017;3: 1–225. doi:www.anses.fr/Documents/PASER-Ra-INCA2.pdf
45. Hurrell RF, Lynch SR, Trinidad TP, Dassenko SA, Cook JD. Iron absorption in humans as influenced by bovine milk proteins. *Am J Clin Nutr.* American Society for Nutrition; 1989;49: 546–52. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/2923087>

Annexe

Table 1: Contraintes nutritionnelles appliquées dans les modèles d'optimisation. H : hommes ; F : femmes.

Energie et nutriments	Contrainte	Référence
Energie (kcal/j)	Egale à l'énergie totale du régime observé	
Protéines (% énergie)	10–20	(1)
Glucides (% énergie)	50–75	(2)
Lipides totaux (% énergie)	20–35	(3)
Acide α -linoléique (% énergie)	$\geq 0,5$	(3)
Acide linoléique (% énergie)	2,5–9	(3)
EPA + DHA (g/j)	$\geq 0,25$	(3)
Acides gras polyinsaturés (% énergie)	6–11	(3)
Acides gras saturés (% énergie)	≤ 10	(4)
Sucres libres (% énergie)	≤ 10	(4)
Sodium (mg/j)	1500–2759 (H) ; 1500–2365 (F)	(5)
Cholestérol (mg/j)	≤ 300	(4)
Fibres (g/j)	≥ 30	(6)
Vitamine A (μg équivalent rétinol)	800-1800 (H) ; 600-1600 (F)	(6)
Thiamine (mg/j)	$\geq 1,3$ (H) ; 1,1 (F)	(6)
Riboflavine (mg/j)	$\geq 1,6$ (H) ; 1,5 (F)	(6)
Niacine (mg/j)	14–47 (H) ; 11–47 (F)	(6)
Vitamine B12 (μg /j)	$\geq 2,4$	(6)
Acide pantothénique (mg/j)	≥ 5	(6)
Vitamine B6 (mg/j)	1,8–6,8 (H) ; 1,5–6,8 (F)	(6)
Folates (μg /j)	330–1500 (H) ; 300–1500 (F)	(6)
Acide ascorbique (mg/j)	110–1110	(6)
Vitamine D (μg /j)	\geq quantité du régime observé	
Vitamine E (mg/j)	12–52	(6)
Zinc (mg/j)	12–50 (H) ; 10–50 (F)	(6)
Zinc absorbé (mg/j)	3 (H) ; 2,5 (F)	
Sélénium (μg /j)	60–350 (H) ; 50–350 (F)	(6)
Potassium (mg/j)	≥ 3100	(6)
Phosphore (mg/j)	≥ 750	(6)
Magnésium (mg/j)	420–770 (H) ; 360–710 (F)	(6)
Iode (μg /j)	≥ 150	(6)
Fer (mg/j)	9–28 (H) ; 16–28 (F)	(6)
Fer absorbé (mg/j)	$\geq 0,9$ (H) ; 1,6 (F)	
Cuivre (mg/j)	≥ 2 (H) ; 1,5 (F)	(6)
Cuivre (mg/kg poids corporel)	$\leq 0,5$	
Calcium (mg/j)	900–2000	(6)

Références

1. WHO/FAO/UNU. Protein and amino acid requirements in human nutrition: Report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation. Geneva; 2002.
2. Mann J, Cummings JH, Englyst HN, Key T, Liu S, Riccardi G, Summerbell C, Uauy R, van Dam RM, Venn B, et al. FAO/WHO scientific update on carbohydrates in human nutrition: conclusions. *Eur J Clin Nutr.* 2007;61 Suppl 1:S132-7.
3. FAO/WHO. Interim summary of conclusions and dietary recommendations on total fat & fatty acids. 2008.
4. Joint WHO/FAO Expert Consultation. Diet, nutrition and the prevention of chronic diseases. *World Health Organ Tech Rep Ser.* 2003;916:i–viii, 1-149, backcover.
5. Pietinen P, Valsta LM, Hirvonen T, Sinkko H. Labelling the salt content in foods: a useful tool in reducing sodium intake in Finland. *Public Health Nutr.* Proquest; 2008;11:335–40.
6. Martin. Apports nutritionnels conseillés pour la population française, 3ième édition (Recommended dietary references for French population, 3rd edition). 3rd ed. Tec et Doc Lavoisier; 2000. 605 p.