

2022

POSITION DE L'ONAV RELATIVE À L'APPRÉCIATION DE LA QUALITÉ NUTRITIONNELLE DES PROTÉINES VÉGÉTALES



ONAV

Organisation

L'Observatoire national de l'alimentation végétale (ONAV) met en œuvre une expertise scientifique et médicale transparente et indépendante. Les membres de son conseil scientifique ainsi que les collaborateur·trice·s apportent, dans leurs propres domaines de compétence, une contribution technique aux expertises. L'ONAV a pour mission d'étudier les alimentations majoritairement végétales (flexitarisme, végétarisme et véganisme), de diffuser les connaissances dans ce domaine auprès du grand public et des professionnel·le·s de santé et de protéger la santé des personnes ayant choisi ce type d'alimentation. Elle fournit ainsi des recommandations adaptées à ces dernières. Ses activités relèvent d'une mission d'intérêt général. Ses positions et revues sont disponibles sur son site internet www.onav.fr.

Groupe de travail

Les membres du groupe de travail sur ce document sont nommés à titre personnel et ne représentent pas leur organisme d'appartenance. Ils sont membres du conseil scientifique de l'Observatoire national de l'alimentation végétale (ONAV) et ne déclarent aucun lien d'intérêt financier avec l'industrie pharmaceutique ou agroalimentaire.

Responsables

Fabien Badariotti, *docteur en biochimie et biologie cellulaire*

Sébastien Demange, *médecin spécialiste en médecine générale*

Membres

Virginie Bach, *diététicienne nutritionniste*

Perrine Bellanger, *diététicienne nutritionniste*

Loïc Blanchet-Mazuel, *médecin spécialiste en médecine générale*

Nadège Blot, *médecin spécialiste en médecine générale*

Killian Bouillard, *docteur en sciences du sport*

Marie-Gabrielle Domizi, *diététicienne nutritionniste*

Hervé Dréau, *médecin spécialiste en médecine générale, spécialiste en santé publique*

Léa Lebrun, *diététicienne nutritionniste, psychologue*

Paco Maginot, *médecin spécialiste en médecine générale*

Caroline Roth, *médecin spécialiste en médecine générale*

Marie Vincey, *pharmacienne, diplômée en toxicologie*

Remerciements

Nous remercions François Mariotti (AgroParisTech) pour ses commentaires sur le résumé de cette position.

Contexte et objet

Les alimentations majoritairement végétales sont de plus en plus populaires en France. De nombreuses institutions, dont l'Académie américaine de diététique ([Melina and al., 2016](#)), affirment qu'elles peuvent être suivies à tout âge de la vie. Les études nutritionnelles sur la population française montrent même qu'elles sont le plus en adéquation avec les recommandations nutritionnelles. Une large adoption de ces alimentations semble cependant entravée par l'existence de freins culturels ([Allès et al., 2017](#)). Parmi les barrières évoquées à une végétalisation de l'alimentation, la question de la qualité et de la quantité des protéines dans le monde végétal demeure ([Lea et al., 2003](#) ; [Wyker et Davidson, 2010](#)). Toute personne végétarienne a déjà été questionnée quant à son apport en protéines. Une étude portant sur la représentation des mères françaises (d'enfant de 6 à 11 ans) montre que les protéines sont associées principalement à la viande rouge. L'étude précise que « les mères du sous-groupe « grandes consommatrices de viande » n'envisagent pas la possibilité que les aliments riches en protéines animales soient substitués par d'autres aliments, tandis que les faibles consommatrices de viande évoquent spontanément des aliments riches en protéines végétales comme substitut à la viande » ([Poquet et al., 2017](#)). Encore récemment la ministre de la Santé alors en exercice, la Dr Agnès Buzyn, a déclaré le 12 juin 2019 dans une émission de grande écoute que « Je le dis, les enfants ont besoin de protéines pour grandir, mais ils ont besoin de protéines essentielles, celles que l'on ne trouve pas dans les végétaux ».

La désinformation autour des protéines végétales est historique. L'hégémonie de la viande comme aliment source de protéines de qualité a commencé dès le début de la découverte de celles-ci. Les thèses de François Magendie montrent la nécessité de l'apport d'azote des protéines animales pour la santé humaine au début du XIX^e. Peu après, les expériences de

Justus von Liebig vantent les mérites de la viande comme aliment nécessaire pour les travailleurs de force. En 1863, Edward Smith, médecin britannique, démontre que l'azote n'est pas fondamental pour l'effort et que les théories de Liebig sont fausses, mais l'idée perdure. À la fin du XIX^e, les expériences de Carl Von Voit démontrent que les protéines végétales peuvent aisément suffire à la couverture des besoins protéiques et même les dépasser. En France, dès le début du XX^e siècle, des médecins proposent des alimentations sans viande, notamment pour les diabétiques et les personnes atteintes de maladies cardiovasculaires (Marchand, 2014). Cependant, malgré ces diverses avancées scientifiques, l'idée que les protéines animales constituent une nécessité demeure encore bien installée.

Au cours du XX^e siècle, une nouvelle méthode d'évaluation de la qualité protéique voit le jour. Basées sur une mesure de la croissance chez de jeunes rats, ces études semblent consacrer définitivement la supériorité des protéines animales sur leurs homologues végétales (Boye, 2012). Cependant, il est aujourd'hui établi que la croissance des rats nécessite davantage de méthionine que celle des humains. En conséquence, la qualité des protéines pauvres en méthionine (comme c'est typiquement le cas pour les légumineuses) était grandement sous-estimée par les approches utilisant ce modèle « rongeur ». Depuis quelques années, la recherche en nutrition dresse un portrait bien plus favorable à la qualité des protéines végétales (Young, 1991 ; Boye, 2012 ; Mariotti, 2017). Au niveau du grand public, la perception des protéines végétales semble également changer. Ainsi, le dernier sondage du baromètre des consommateurs de septembre 2020 montre pour la première fois une meilleure perception des protéines végétales par rapport aux protéines animales : 59 % les estiment meilleures pour la santé et 53 % meilleures pour l'environnement¹.

Cet article propose de faire le point sur les connaissances concernant les protéines végétales. Il s'agira d'apporter des réponses aux questionnements et idées reçues concernant ce macronutriment. Qu'est-ce qu'une protéine ? Quels sont nos besoins en protéines ? Qu'est-ce qu'une protéine dite de qualité ? Tous les acides aminés sont-ils présents dans les végétaux ? Quel est l'impact sur la santé et sur l'environnement des protéines végétales ? Doit-on diminuer notre consommation de protéines animales ? Peut-on se passer totalement des protéines animales ? Risque-t-on de manquer d'un acide aminé en particulier ?

¹ <http://www.proteinesfrance.fr/fr/infographie-les-proteines-vegetales-et-nouvelles-ressources-vues-par-les-francais>

Résumé

- Une protéine est un assemblage d'acides aminés. Ces derniers ont de nombreuses fonctions dans le corps au-delà du fait de constituer les protéines. Les fonctions des protéines sont elles aussi multiples.
- Il n'existe pas de protéines indispensables mais des acides aminés indispensables. Ces acides aminés doivent être apportés par l'alimentation.
- Il existe une synthèse d'acides aminés par le microbiote. La significativité de cet apport est encore discutée.
- Le risque d'un défaut en acide aminé repose, en France, uniquement sur la lysine.
- Historiquement, la qualité des protéines végétales a été sous-évaluée.
- Plus la quantité de protéines ingérées augmente, moins leur profil en acides aminés constitue un critère pertinent.
- Pour un adulte en bonne santé les besoins en protéines sont de 0,66 g/kg de poids corporel/jour pour satisfaire les besoins de 50 % de la population. Pour satisfaire les besoins de 97,5 % de la population, ces besoins sont de 0,83 g/kgpc/j. Il est possible que la valeur optimale de consommation soit autour de 1g de protéine/kgpc/j. Il ne semble pas y avoir de limite supérieure de sécurité franche bien qu'il ne semble pas y avoir de bénéfice à consommer plus de 1,6 g de protéine/kgpc/j. Au-delà, cela peut poser des problèmes de santé à long terme. Les besoins peuvent être légèrement supérieurs pour les personnes âgées, les personnes enceintes et les sportifs de haut niveau. Les protéines doivent représenter 10 à 20 % de l'apport énergétique journalier total.
- La vision des acides aminés fournis par les protéines reposant sur un aliment isolé peut être intéressante intellectuellement, mais n'a pas d'aspect pratique car les apports protéiques dans un repas, et encore plus sur plusieurs repas consécutifs, sont multiples.
- Le terme de protéine complète, ou incomplète, n'a pas de sens quand on parle d'alimentation. En effet, les sources de protéines sont multiples, tant à l'échelle de chaque prise alimentaire qu'à l'échelle de la journée.
- Il existe une réserve d'acide aminé dans le corps permettant que chaque repas n'ait pas à fournir tous les acides aminés indispensables en quantité adéquate.
- Les méthodes d'évaluation de la qualité d'une protéine (PDCAAS et DIAAS) reposent généralement sur un aliment isolé et une prise alimentaire unique, ces indicateurs ne constituent pas des mesures fidèles de la qualité des protéines consommées au sein d'une alimentation.
- La population française n'est pas à risque de carence en protéines. Nous consommons actuellement, tous régimes confondus, plus de protéines que nécessaire.
- On peut végétaliser à 100 % notre alimentation, sans risque de manquer de lysine, à condition d'avoir une alimentation variée (légumineuses, fruits à coque, céréales complètes) ou des apports en protéines importants.

- L'apport en protéines ne devrait pas reposer sur la seule consommation de céréales : à l'échelle de la journée, il convient d'associer plusieurs sources protéiques telles que les légumes, les fruits secs, les céréales, les légumineuses, etc.
- Les résultats de plusieurs études suggèrent que le niveau de végétalisation de l'alimentation pourrait conduire à des accommodations métaboliques modifiant les besoins en acides aminés.
- L'alimentation végétale n'est pas simplement un retrait des produits animaux mais une modification plus profonde de l'alimentation. Les questionnaires sur l'alimentation ne sont pas toujours adaptés aux alimentations végétales.
- Une alimentation végétale peut fournir tous les besoins en acides aminés, et cela à tout âge de la vie et quel que soit le niveau d'activité physique.
- Les enfants ont des besoins énergétiques si importants qu'une carence en protéines est hautement improbable si ceux-ci sont satisfaits.
- Les personnes âgées peuvent bénéficier de voir leurs apports protéiques bien répartis tout au long de la journée. Une activité physique adaptée et régulière semble également importante pour lutter contre le risque de sarcopénie.
- Dans le contexte alimentaire français, où les apports en protéines sont suffisamment élevés et variés, la faible différence entre les protéines d'origine végétale et animale en termes de biodisponibilité et de teneur en acide aminé n'est pas pertinente pour éclairer le débat sur la qualité nutritionnelle des protéines.
- De manière plus globale, les protéines dites de qualités sont celles orientant vers des alimentations meilleures à la fois pour la santé et l'environnement. Ce changement de paradigme conduit à considérer que les protéines d'origine végétale sont, en moyenne, de meilleure qualité que les protéines d'origine animale.

Sommaire

Organisation	1
Groupe de travail.....	1
Remerciements	2
Contexte et objet.....	2
Résumé	4
Sommaire	6
Glossaire	8
1. Les protéines : présentation générale.....	12
1.1. Qu'est-ce qu'une protéine ?	12
1.2. D'où proviennent les acides aminés issus de l'absorption intestinale ?.....	18
2. La digestion des protéines.....	19
2.1. Actions de l'appareil digestif	19
2.2. Participation du microbiote intestinal	22
2.3. Utilisation des acides aminés	22
2.4. Régulation du métabolisme des protéines	24
2.4.1 Actions hormonales.....	25
2.4.2. Actions des acides aminés.....	25
2.4.3. Variations en fonction des périodes de prises alimentaires et de « jeûne ».....	26
3. Évaluation de la qualité des protéines alimentaires	28
3.1. La qualité protéique évaluée chez l'humain : des données sans cesse révisées au cours des années.....	28
3.1.1. Avant le rapport de la FAO en 1973	28
3.1.2. De 1975 aux années 2000	29
3.1.3. Les études depuis les années 2000	29
3.1.4. Conclusion	30
3.2. Méthodes utilisant l'indice chimique (IC)	30
3.2.1. Définitions de l'IC	30

3.2.2. Détermination du profil protéique idéal.....	33
3.2.3. Calcul de l'IC	36
3.2.4. Comment substituer les protéines animales par des protéines végétales ?.....	45
3.3. Estimation de la qualité protéique en intégrant IC et digestibilité.....	48
3.4.1. Les différentes mesures de digestibilité	51
3.4.2. Digestibilité protéique fécale	52
3.4.3. Digestibilités protéiques iléales	53
3.4.4. Apports et limite de la méthode DIAAS	55
3.4.5. Au-delà de la qualité protéique : l'influence du régime alimentaire ?.....	56
3.4.6. Conclusion	58
4. La quantité de protéines dont le corps humain a besoin	59
4.1. Apports protéiques des alimentations végétales	62
4.2 Quand la qualité dépend de la quantité	63
4.3. Limite supérieure de sécurité (LSS).....	65
4.4. L'alimentation végétale équilibrée : des apports protéiques optimaux en quantité et en qualité.....	66
5. Apports en protéines de la population française.....	72
5.1. Les protéines dans la population végétarienne	74
5.1.1. Apport en protéines chez les végétarien.nes.....	74
5.1.2. Différences alimentaires des végétarien.nes.....	75
5.2. Situations spécifiques.....	77
5.2.1. Enfants.....	77
5.2.2. Sportifs et sportives	79
5.2.3. Sujet âgé	81
6. Conclusion	83
Références.....	84

Glossaire

Acides aminés indispensables (AAI)

Chez les humains, il s'agit de 9 acides aminés qui ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme ou pas à une vitesse suffisante pour répondre aux besoins physiologiques. En conséquence, ces derniers doivent obligatoirement être apportés depuis l'extérieur (typiquement, via l'alimentation). Les 11 autres acides aminés peuvent être synthétisés par l'organisme et sont, par contraste, qualifiés d'Acides Aminés Non Indispensables (AANI).

Acides aminés conditionnellement indispensables (AAci)

Certaines situations (cicatrisation importante, infection, etc.) se caractérisant par une forte augmentation des besoins en certains AANI font que ces derniers doivent être considérés comme des AAI.

Apport énergétique total (AET)

L'Anses² définit l'AET ainsi : apport fournis par les aliments et les boissons calculés ainsi (kcal) : $AET = \text{Protéines} \times 4 + (\text{Glucides disponibles} - \text{Polyols}) \times 4 + \text{Polyols} \times 2,4 + \text{Fibres} \times 2 + \text{Acides organiques} \times 3 + \text{Lipides} \times 9 + \text{Alcool} \times 7$.

L'apport énergétique sans alcool (AESa)

Il est calculé comme l'AET en excluant la contribution énergétique de l'alcool.

Besoin nutritionnel (BN)

Quantité minimale d'un nutriment donné devant être régulièrement consommé pour assurer l'entretien, le fonctionnement métabolique et physiologique, et éventuellement la croissance, et de façon générale pour garantir la santé d'un individu bien portant. Pour définir le besoin nutritionnel dans une population homogène (sexe, âge, etc.), on cherche usuellement à définir la moyenne (appelé dans ce cas Besoin Nutritionnel Moyen : BNM) ou la médiane de ce besoin et à en estimer sa dispersion dans la population étudiée, le plus souvent par un écart-type.

Besoin Nutritionnel Moyen (BNM)

Besoin quotidien moyen au sein de la population, tel qu'estimé à partir de données individuelles d'apport en relation avec un critère d'adéquation nutritionnelle lors d'études expérimentales.

² Etude Inca3, note n°63

Biodisponibilité des acides aminés

Il s'agit d'une mesure de la proportion des acides aminés (AA) consommés (via l'alimentation) qui est effectivement utilisée par l'organisme pour son fonctionnement. Comme il n'existe actuellement pas de méthode pour mesurer directement la biodisponibilité, elle est souvent estimée par la digestibilité, grandeur mesurant la proportion des AA alimentaires absorbée par l'organisme au niveau du tube digestif. Cette approximation semble validée par le fait qu'il existe une très bonne corrélation entre biodisponibilité et digestibilité (Stein et al., 2007 ; Boye et al., 2012).

Fibres alimentaires (FA)

Il s'agit d'un glucide végétal qui n'est ni digéré ni absorbé jusqu'à la fin de l'intestin grêle et dont la consommation apporte des bénéfices pour la santé.

Limite supérieure de sécurité (LSS)

Seuil au-delà duquel il apparaît un risque lié à la surconsommation d'un nutriment donné. Une limite de sécurité n'est proposée ni pour l'azote ni pour les acides aminés. Cependant, il existe des seuils d'apport protéique au-delà desquels les apports sont considérés comme élevés ou très élevés. Ces quantités dépassent amplement les recommandations quotidiennes, ils conduisent à envisager des effets délétères pour la santé, notamment s'ils sont poursuivis dans le temps.

Macronutriment

Nutriment dont l'organisme humain a besoin en grande quantité (plusieurs dizaines de grammes par jour) et qui fournit de l'énergie. Les protéines sont une des trois catégories de macronutriments avec les lipides et les glucides.

Micronutriment

Nutriment dont l'organisme humain a besoin en petite quantité (en milligrammes ou microgrammes par jour) et qui ne fournit pas d'énergie.

Odd ratio (OR) ou « rapport des cotes »

Rapport de l'odd de l'événement dans le groupe traité divisé par l'odd de l'événement dans le groupe contrôle. L'odd est égal à $c = r / (1 - r)$ où r est la fréquence de l'événement. Ainsi un odd est le rapport du nombre de patients présentant l'événement, $r \times n$, divisé par le nombre de patients ne présentant pas l'événement, $(1-r) \times n$. Par exemple, un odd de 0,25 correspond au rapport $2/8$ et signifie que pour 2 patients présentant l'événement, 8 ne le présentent pas ($0,25=2/8=r/(1-r)$). Dans la même situation, le risque est 0,20 ($2/10$). Un odd peut aussi être

interprété de la façon suivante : dans un groupe, pour 100 patients ne présentant pas l'événement étudié, 100*c le présentent.

Référence Nutritionnelle pour la Population (RNP)

Apport quotidien qui couvre le besoin de presque toute la population considérée, tel qu'estimé à partir des données expérimentales. La RNP est calculée à partir de l'estimation des paramètres de la distribution du besoin. Le plus souvent, la RNP est estimée à partir du BNM auquel on ajoute deux écart-types, pour déterminer ainsi l'apport qui couvre le besoin de 97,5 % de la population. L'écart-type étant le plus souvent estimé à 15 % du BNM, la RNP vaut alors 1,3 fois le BNM. Cette définition est consensuelle et est reprise à son compte par l'Anses (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) depuis 2016. Elle correspond à celle de l'ancien terme « apport nutritionnel conseillé », ANC, qui était également utilisé par extension pour différents types de références nutritionnelles. Dans un souci de clarté, le terme d'ANC a été abandonné au profit de RNP et de deux nouveaux types de références nutritionnelles : l'apport satisfaisant (AS) et l'intervalle de référence (IR).

Viande rouge

Dans les études scientifiques, la viande rouge désigne les viandes de mammifères ruminants (vaches, moutons, chèvres, buffles, bisons, etc.) et également celle issue du porc, de l'âne ou du cheval. De fait, la viande blanche est représentée par la volaille et le lapin. En France, les recommandations de l'Anses et du PNNS (Plan National Nutrition Santé) n'utilisent pas cette dichotomie, mais distinguent deux autres groupes de viande : « volaille » et « viande hors volaille » (viande rouge et de lapin).

Régime DASH (Dietary Approach to Stop Hypertension)

Il s'agit d'une alimentation préconisée depuis les années 1990 par le National Institutes of Health (NIH) pour éviter l'hypertension artérielle³. Cette alimentation supprime complètement les viandes rouges et conseille de limiter les viandes blanches (volailles). Il s'agit également de limiter les apports en sel. Les aliments conseillés sont les fruits, les légumes, les céréales complètes, les légumineuses, les poissons et les produits laitiers écrémés ou demi-écrémés.

Régime méditerranéen⁴

Il s'agit d'une alimentation se basant sur les produits céréaliers complets, les fruits, les légumineuses, les noix, les légumes, l'huile d'olive et enfin les produits laitiers maigres. Le

³ https://www.nhlbi.nih.gov/files/docs/public/heart/new_dash.pdf

⁴ <https://www.icm-mhi.org/fr/prevention/adopter-saines-habitudes-vie/alimentation-mediterraneenne>

poisson est conseillé 3 fois par semaine. Les viandes, les œufs et les sucreries sont conseillés de manière exceptionnelle.

Valeur de sûreté

Valeur pour laquelle l'apport est suffisant pour 97,5 % de la population étudiée. Pour les protéines cela correspond à la RNP.

Valeur médiane

Pour une grandeur d'intérêt (ex : le besoin protéique journalier), il s'agit de la valeur séparant une population donnée en une moitié supérieure et une moitié inférieure, dans un contexte où les valeurs sont ordonnées de manière croissante.

Valeur moyenne

Valeur correspondant à la moyenne des valeurs obtenues dans un échantillon donné. Par exemple à la consommation moyenne des individus.

1. Les protéines : présentation générale

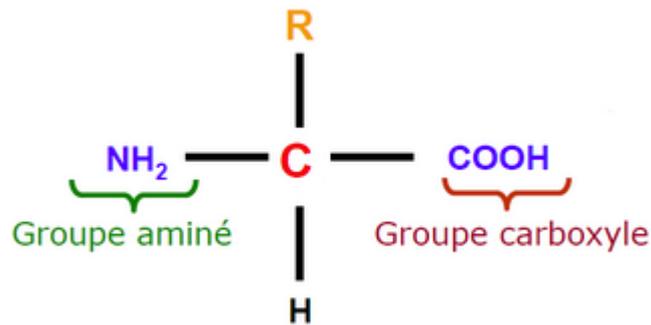
1.1. Qu'est-ce qu'une protéine ?

Les protéines constituent, avec les glucides et les lipides, un des trois groupes de macronutriments. Les protéines ont des fonctions multiples dans l'organisme. Il peut s'agir d'enzymes (catalyseurs biologiques accélérant le déroulement d'une réaction chimique), de protéines structurales (fournissant un soutien mécanique aux cellules et aux tissus), de protéines de transport (transportant des petites molécules ou des ions), de protéines motrices (généralant le mouvement dans les cellules et les tissus), de protéines de stockage (stockant des petites molécules et des ions), de protéines signal (transmettant des signaux intra et intercellulaires), de protéines réceptrices (utilisées par des cellules pour détecter des signaux extracellulaires et les transmettre à la machinerie cellulaire induisant une réponse) ou de protéines régulatrices de gène (se liant à l'ADN pour inhiber ou induire l'expression d'un gène). Les protéines peuvent également avoir d'autres rôles comme la production d'énergie.

Dans le noyau de nos cellules, se trouvent séquestrées de longues molécules d'ADN (Acide DésoxyriboNucléique) pouvant être subdivisées en plusieurs milliers d'unités fonctionnelles appelées gènes (environ 20 000). Au gré des besoins cellulaires, tel ou tel gène est transcrit en son ARNm (Acide RiboNucléique messenger) correspondant qui quitte le noyau pour rejoindre le cytosol. Cet ARNm sera traduit en protéine sous l'action conjointe des ribosomes et des ARNt (ARN de transfert). Plus précisément, l'information portée par la séquence de l'ARNm spécifie dans quel ordre les acides aminés (AA) se succèdent au sein de la protéine correspondante. Il existe 20 acides aminés différents pouvant entrer dans la composition d'une protéine ([Tableau 1](#)). Les acides aminés sont par définition composés d'un groupement carboxylique (-COOH), d'un groupement amine (-NH₂) et d'un radical R qui le caractérise ([Schéma 1](#)).

Schéma 1 : Structure chimique générale d'un AA

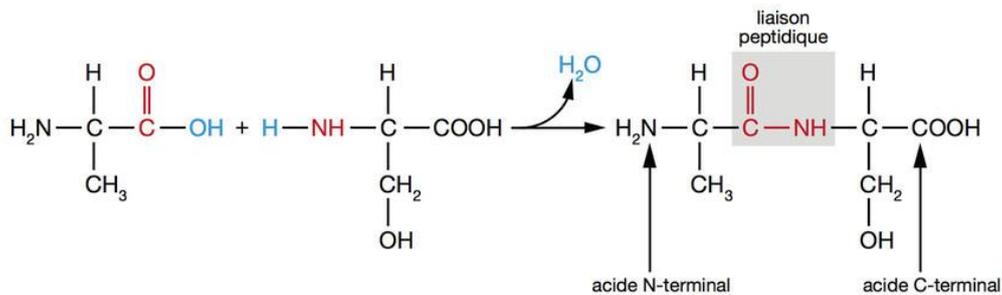
Un acide aminé est composé d'un groupe aminé (NH₂), d'un groupe carboxyle (COOH) et d'un radical R. C'est le radical R qui détermine les propriétés et singularités biochimiques de chaque acide aminé. Les acides aminés sont des amphotères : en fonction du pH, le groupe carboxyle peut être ionisé négativement et le groupe amine positivement.



La séquence d'acides aminés d'une protéine constitue sa structure primaire (Schéma 2).

Schéma 2 : Structure protéique primaire

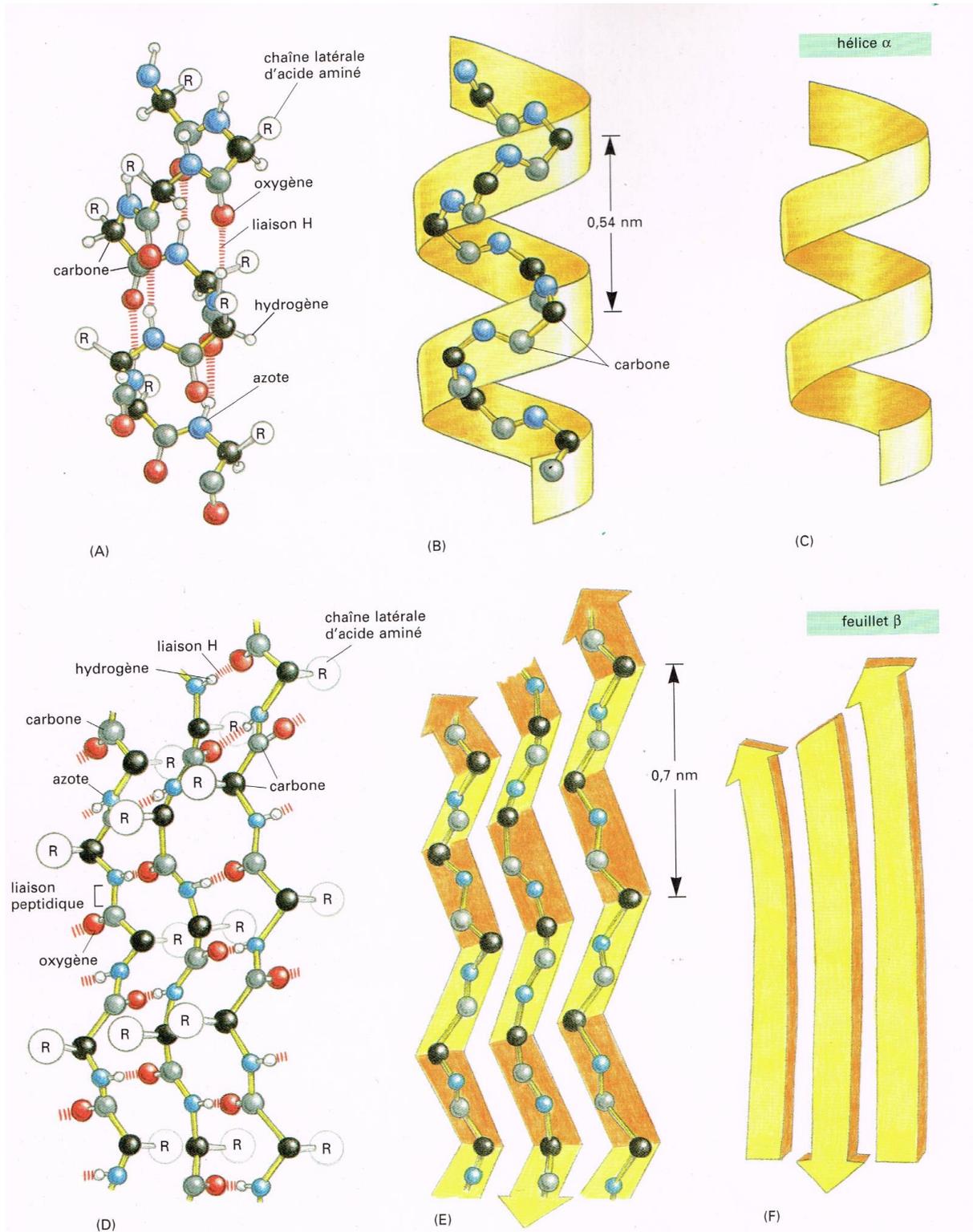
Les protéines sont des polymères d'acides aminés qui sont reliés entre eux par une liaison covalente caractéristique appelée liaison peptidique. Cet enchaînement d'AA représente la structure primaire de la protéine.



Cette chaîne d'AA va ensuite se replier sur elle-même en fonction de ce qui est énergétiquement le plus favorable (des interactions locales s'établissent entre AA situés à proximité le long de la chaîne protéique), s'organisant ainsi dans l'espace sous la forme d'hélices, de feuillets et de coudes (structures protéiques secondaires, schéma 3).

Schéma 3 : Structure protéique secondaire (Alberts et al. 1998)

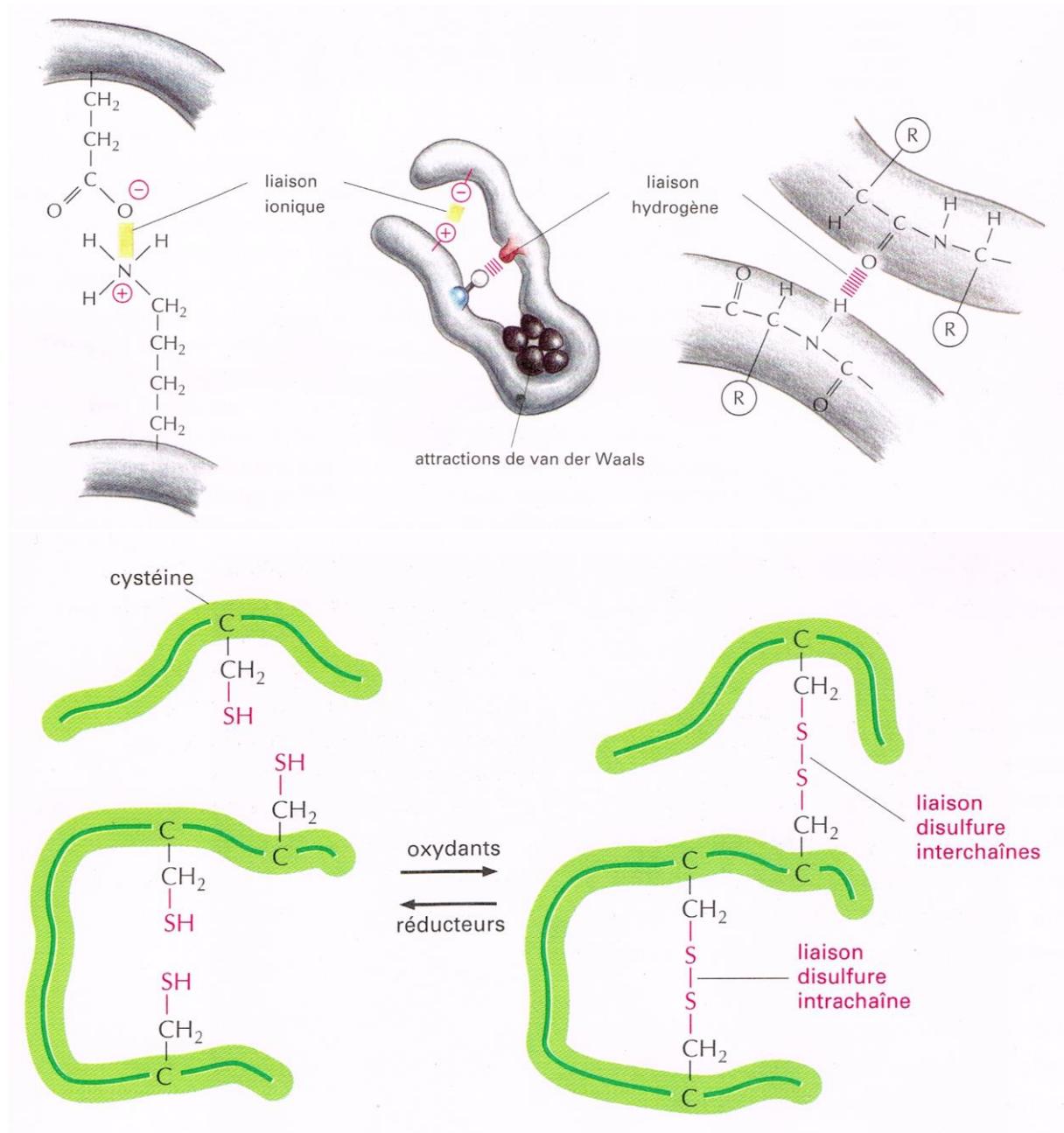
Des repliements caractéristiques de la structure primaire sont responsables de la structure secondaire de la protéine. Exemples de l'Hélice alpha et du Feuillet bêta.



La protéine connaît un dernier niveau d'arrangement spatial (structure protéique tertiaire, schéma 4) responsable de son activité biologique.

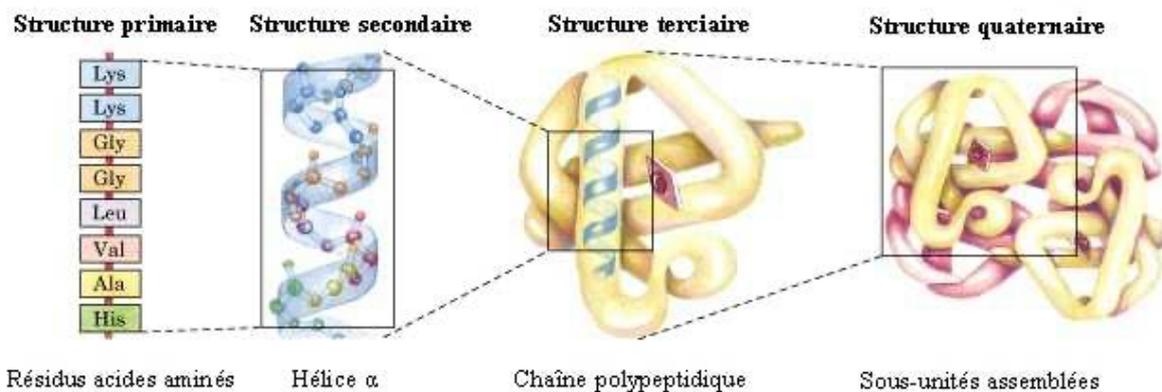
Schéma 4 : Structure protéique tertiaire (Alberts et al. 1998)

Au sein de la structure protéique secondaire, certains atomes vont établir des interactions supplémentaires. Ainsi, se constituent de nouvelles liaisons covalentes (ponts disulfures) et non covalentes (force de Van der Waals, liaisons ionique et hydrogène, etc.), à l'origine d'un repliement protéique complexe et contraint. Le(s) site(s) actif(s) caractérisant l'activité biologique de telle ou telle protéine résulte(nt) de ce niveau d'arrangement spatial supérieur appelé structure tertiaire.



Cette structure protéique tertiaire résulte de l'interaction entre AA davantage éloignés le long de la chaîne (divers types d'interactions sont observées : hydrophobes, liaisons ioniques, de Van der Waals, covalentes, etc.). Il faut noter que la structure tertiaire est tributaire des caractéristiques physico-chimiques du milieu (pH, température, composition ionique, etc.), si bien que l'activité biologique d'une protéine est directement dépendante de son environnement. Par ailleurs, certaines protéines ne présentent aucune activité sous leur forme isolée. En effet, elles doivent être associées à une ou plusieurs autres afin de former un complexe protéique biologiquement actif (structure protéique quaternaire) (Alberts et al. 1998). Les différentes structures sont représentées dans le Schéma 5 : par ordre croissant de complexité, de la structure primaire à la structure quaternaire.

Schéma 5 : Les différentes structures d'une protéine



Par convention, une protéine comportant moins de 50 AA est appelée peptide. La taille d'une protéine est extrêmement variable de quelques acides aminés à plus de 1000 (par exemple pour certains collagènes). Dans la suite de cet article, sauf précision contraire, le terme « protéine » sera utilisé dans un sens large regroupant à la fois les peptides et les protéines *stricto sensu*. L'unité de masse moléculaire des protéines s'exprime généralement en Dalton (Da), par exemple l'albumine, principale protéine sérique, comporte 585 acides aminés et a une masse d'environ 65 kDa.

Tableau 1 : Caractéristiques des 20 acides aminés codés par l'ARNm

Les acides aminés (AA) sont rangés ici par ordre alphabétique. Le ou les triplets de nucléotides (codons d'ARNm) codant chaque AA sont précisés (à l'exception du tryptophane, chaque acide aminé est codé par au moins deux codons différents). Un codon-stop conditionne l'arrêt de la synthèse protéique. Pour chaque acide aminé, son statut indispensable ou non (ou conditionnellement indispensable) est rappelé. De plus, les principales caractéristiques de leur

chaîne latérale sont également indiquées : polaire ou non, chargée ou non (si chargée : positive ou négative). Les caractéristiques biochimiques plus singulières sont spécifiées à l'aide du code couleur suivant :

- Jaune pour les acides aminés à chaîne latérale ramifiée (parfois appelés acides aminés branchés)
- Rouge pour les acides aminés soufrés
- Vert pour les acides aminés aromatiques

Acide aminé	Abrév.		Codon(s) d'ARN messager	Chaîne latérale	Indispensable
Alanine	A	Ala	GCU, GCC, GCA, GCG	Non polaire	Non
Arginine	R	Arg	CGU, CGC, CGA, CGG, AGA, AGG	Positive	Conditionnellement
Asparagine	N	Asn	AAU, AAC	Polaire non chargée	Non
Aspartate	D	Asp	GAU, GAC	Négative	Non
Cystéine	C	Cys	UGU, UGC	Non polaire	Conditionnellement
Glutamate	E	Glu	GAA, GAG	Négative	Conditionnellement
Glutamine	Q	Gln	CAA, CAG	Polaire non chargée	Non
Glycine	G	Gly	GGU, GGC, GGA, GGG	Non polaire	Non
Histidine	H	His	CAU, CAC	Positive	Oui
Isoleucine	I	Ile	AUU, AUC, AUA	Non polaire	Oui
Leucine	L	Leu	UUA, UUG, CUU, CUC, CUA, CUG	Non polaire	Oui
Lysine	K	Lys	AAA, AAG	Positive	Oui
Méthionine	M	Met	AUG	Non polaire	Oui
Phénylalanine	F	Phe	UUU, UUC	Non polaire	Oui
Proline	P	Pro	CCU, CCC, CCA, CCG	Non polaire	Non
Sérine	S	Ser	UCU, UCC, UCA, UCG, AGU, AGC	Polaire non chargée	Non
Thréonine	T	Thr	ACU, ACC, ACA, ACG	Polaire non chargée	Oui
Tryptophane	W	Trp	UGG	Non polaire	Oui
Tyrosine	Y	Tyr	UAU, UAC	Polaire non chargée	Conditionnellement
Valine	V	Val	GUU, GUC, GUA, GUG	Non polaire	Oui
Codon-stop	-	Term	UAA, UAG, UGA	-	-

Il existe une exception concernant un acide aminé particulier qui peut être intégré dans les protéines : la sélénocystéine. En effet, il existe un ARNt permettant d'incorporer dans la séquence d'une protéine la sélénocystéine. Il faut plusieurs éléments pour cela : une séquence inductrice appelée SECIS (*Selenocystein Insertion Sequence*) et, à proximité, un codon UGA. Normalement ce codon indique la fin de la synthèse protéique mais, quand il y a présence d'une séquence SECIS, cela conduit à l'ajout de la sélénocystéine. La sélénocystéine dérive de la sérine obtenue après l'estérification d'un ARNt sérine qui sera ensuite convertie par plusieurs enzymes en sélénocystéine. Au niveau de sa conformation, elle est semblable à la cystéine dont on aurait remplacé le noyau de soufre par du sélénium.

Les 20 acides aminés protéinogènes présentés dans le tableau 1 peuvent subir diverses modifications post-traductionnelles : phosphorylation, méthylation, acétylation, hydroxylation, glycosylation, etc. Ils peuvent également servir à la synthèse d'autres acides aminés. Ainsi, la lysine et la méthionine permettent la synthèse de carnitine, un acide aminé impliqué dans le métabolisme des acides gras. La dégradation de la cystéine ou de la méthionine permet la production de taurine, un acide aminé sulfonique (le groupement carboxyle est remplacé par un groupement sulfonique) aux fonctions variées (ex : neurotransmetteurs, digestion, etc.).

Notons enfin qu'il existe d'autres acides aminés qui n'entrent pas dans la formation des protéines mais qui assurent une fonction métabolique (ex : citrulline, homocystéines, etc.), hormonale (ex : hormones thyroïdiennes, etc.), ou de neurotransmission (ex : DOPA, etc.).

1.2. D'où proviennent les acides aminés issus de l'absorption intestinale ?

Les apports quotidiens en AA proviennent très majoritairement des protéines après hydrolyse des liaisons peptidiques unissant initialement les différents AA entre eux. Ces protéines sources sont de deux origines :

- **Endogène** : une partie de l'apport quotidien en AA provient de protéines produites par l'organisme lui-même. Il s'agit des enzymes contenues dans les sucs salivaires, gastriques, pancréatiques et intestinaux. Il y a aussi d'autres protéines contenues dans la bile et celles issues de la desquamation cellulaire de l'épithélium intestinal. On estime que cette quantité de protéines endogènes est d'environ 90 grammes par jour (Moughan, 2012).
- **Exogène** : ce sont les protéines contenues dans les aliments que nous mangeons. Les aliments riches en protéines sont la viande, les œufs, les produits laitiers, les graines oléagineuses (graines de tournesol ou de sésame, amandes, pistaches, noix, etc.) les

céréales et produits céréaliers ainsi que les légumineuses (soja et légumes secs : pois, fèves, haricots, lentilles, etc.)⁵.

Dans le tube digestif, une très faible quantité d'acides aminés (AA) est apportée sous une forme susceptible d'être directement absorbée, sans subir de processus digestif : AA isolé ou présent sous la forme de di- ou de tri-peptides. Le processus de digestion des protéines est donc une étape préalable nécessaire à l'absorption de la très grande majorité des AA d'origine exogène.

2. La digestion des protéines

2.1. Actions de l'appareil digestif

Pour assurer la synthèse des protéines de l'organisme, le système digestif fragmente les protéines alimentaires en molécules plus petites pour permettre leur absorption. La digestion des protéines commence dans l'estomac grâce à la présence d'une enzyme, la pepsine. Toutefois, cette première étape joue un rôle relativement faible dans la digestion des protéines. Dans le duodénum, les enzymes pancréatiques (trypsine, chymotrypsine) et les enzymes intestinales (aminopeptidase N, aminopeptidase A, dipeptidyl peptidase) viennent poursuivre la fragmentation des protéines en polypeptides, en oligopeptides voire en acides aminés libres. Ces peptidases de la bordure en brosse intestinale réduisent les oligopeptides en AA libres, di- et tripeptides qui peuvent alors franchir la membrane plasmique des entérocytes. Les di- et tri-peptides sont alors hydrolysés par les peptidases intracellulaires qui poursuivent le clivage des liaisons peptidiques. Ce phénomène aboutit à des AA libres. La grande majorité de ces acides aminés (80 à 90 %) rejoindront ensuite le sang portal. Le reste est utilisé directement par les entérocytes (principalement la glutamine, le glutamate, l'aspartate et l'arginine). Si la majorité de l'absorption se déroule au niveau de l'intestin grêle, une petite quantité est également absorbée au niveau du gros intestin (côlon) (Guénard et al., 2009). Remarquons que les di et tri peptides bénéficient d'une absorption active et spécifique de la lumière intestinale vers l'intérieur des entérocytes plus efficace que l'absorption des acides aminés seuls (Adibi et al. 1975 ; Killer et al., 2021). Les acides aminés libres sont transportés moins rapidement du fait de leurs spécificités propres (charge de la chaîne latérale, caractère hydrophile, etc.). En cas d'atteinte intestinale inflammatoire ou infectieuse, l'absorption des di et tri peptides est ainsi moins altérée que celle des acides aminés libres de la lumière intestinale à cause des réactions locales modifiant la perméabilité de la membrane plasmique et modifiant la diffusion de ceux-ci.

⁵ <https://www.anses.fr/fr/content/les-prot%C3%A9ines>

Au niveau intestinal, c'est la glutamine qui est le principal substrat énergétique de l'entérocyte. Son oxydation conduit à la formation d'alanine et de lactate. Le métabolisme épithélial de la glutamine et du glutamate génère également de la proline, de l'ornithine et de la citrulline (Blachier, 2009).

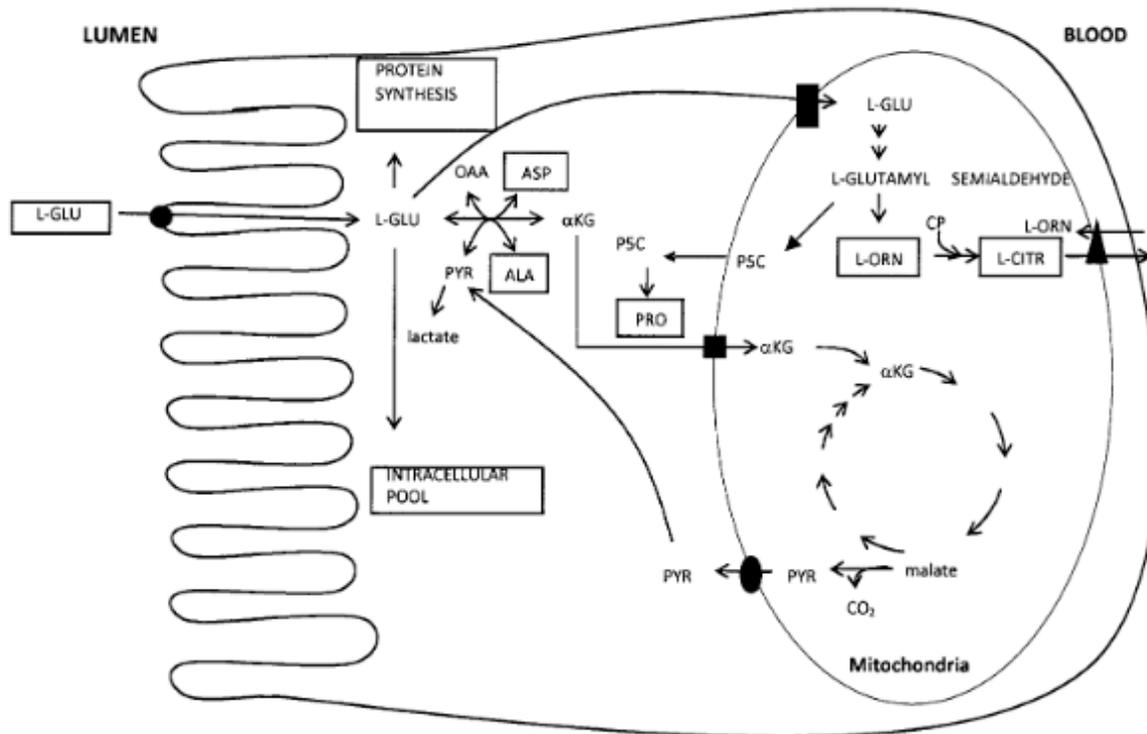


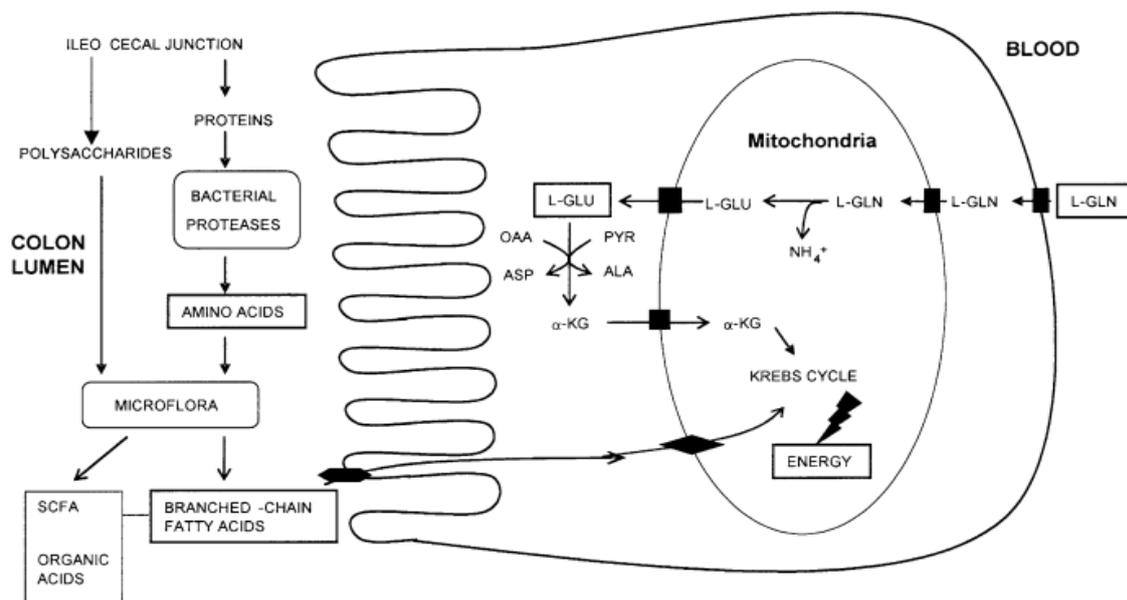
Figure 1. Vue schématique du métabolisme du L-glutamate (L-GLU) dans les cellules épithéliales absorbantes de l'intestin grêle orienté sur la production intracellulaire d'acide aminé à partir du L-glutamate et de sa conversion en α -ketoglutarate (α KG). OAA, oxaloacetate ; ASP, L-aspartate ; PYR, pyruvate ; ALA, L-alanine ; L-ORN, L-ornithine ; L-CITR, L-citrulline ; CP, carbamoylphosphate ; P5C, pyrroline-5-carboxylate ; PRO, L-proline (Blachier, 2009).

Ces métabolites sont ensuite libérés dans le sang portal avec les autres acides aminés absorbés (Matthews et al., 1993). La paroi intestinale utilise de préférence les acides aminés issus de la digestion plutôt que ceux présents dans la circulation mésentérique. À l'état nourri, la glutamine, le glutamate et l'aspartate couvrent près de 80 % des besoins énergétiques de l'épithélium intestinal dont la moitié provient de la digestion. A jeun, la glutamine circulante ne couvre plus que le tiers des besoins énergétiques de la muqueuse (Darmaun, 1993). Ainsi, après ingestion d'un repas, on constate une inadéquation entre l'absorption des acides aminés et leur apparition dans le sang portal. De fait, la synthèse entérocytaire de glycocolle et d'alanine fait qu'ils sont rapidement présents dans le sang portal alors que leur absorption

intestinale est plutôt lente. C'est l'effet inverse qui est observé dans le cas du glutamate et de l'aspartate qui sont très fortement métabolisés dans la muqueuse (AFSSA, 2007).

Au niveau du gros intestin, les acides aminés qui n'ont pas été absorbés sont dégradés par le microbiote, notamment sous la forme d'acides gras qui serviront ensuite de substrats énergétiques pour les colonocytes.

Figure 2. Vue schématique de la production d'énergie dans les cellules épithéliales absorbantes du gros intestin à partir du L-glutamate plasmatique (L-GLU) et des métabolites bactériens de la lumière intestinale. Ces métabolites sont produits à partir de polysaccharides et d'acides aminés. Parmi les acides aminés, le glutamate peut servir de précurseur pour la production de butyrate et d'acétate, qui sont des substrats oxydatifs pour les colonocytes. SCFA, short-chain fatty acids; L-GLN, L-glutamine; OAA, oxaloacetate; ASP, L-aspartate; PYR, pyruvate; ALA, L-alanine; α -KG, α -ketoglutarate (Blachier, 2009).



Les acides aminés circulant dans le sang proviennent donc de la dégradation des protéines. Durant les premières heures suivant un repas, ces acides aminés proviennent majoritairement des organes splanchniques (intestins, foie) grâce à la digestion des protéines alimentaires. En revanche, à distance d'un repas, c'est principalement la dégradation des protéines musculaires qui permet de délivrer des acides aminés dans la circulation sanguine.

Après leur absorption et leur captation partielle par la muqueuse intestinale pour les besoins de celle-ci, les acides aminés sont dirigés vers le foie avant d'être répartis dans tout

l'organisme. Après l'ingestion d'un repas, la zone splanchnique ne relâche que l'équivalent d'environ un tiers des acides aminés ingérés vers les tissus périphériques. Environ 20 % des acides aminés absorbés sont utilisés par l'épithélium intestinal et les tissus viscéaux (Bos et al., 2003b, Reeds et al., 2001). Cette rétention d'acides aminés libres est très variable, 20 % pour la leucine, 50-75 % pour la glutamine et 90 % pour la thréonine ou le glutamate (Reeds, 2000).

2.2. Participation du microbiote intestinal

Par ailleurs, la composition du microbiote intestinal est très variable en fonction des alimentations. La relation entre l'alimentation et le profil microbien intestinal semble suivre un continuum, les végétaliens affichant un microbiote intestinal le plus distinct de celui des omnivores, mais pas toujours sensiblement différent de celui des végétariens. Le profil du microbiote intestinal des personnes végétaliennes diffère en plusieurs caractéristiques, dont une abondance réduite de bactéries pathogènes (ex. *Enterobacteriaceae*), et une plus grande abondance d'espèces protectrices (ex. *F. Prausnitzii*). Il semble qu'il y ait des prévalences différentes en fonction de l'alimentation. Les bactéries de type *Bacteroides* sont adaptées à une diète riche en protéines et graisse animales tandis que l'espèce *Prevotella* prédomine dans une alimentation riche en glucides ou végétarienne (Glick-Bauer, 2014). Or un microbiote intestinal différent peut conduire à des actions différentes sur les aliments présents dans le tube digestif. Ainsi il pourrait être pertinent de considérer que la production de protéines par le microbiote intestinal peut être différente en fonction du régime alimentaire des individus. Il a été montré que le microbiote intestinal peut synthétiser de la lysine (Torrallardona et al., 1996). Chez l'humain, cette contribution pourrait représenter 11 à 20 mg/kgpc/j (soit environ 20 % de la lysine circulante dans le plasma) (Metges et al., 1999, Metges, 2000, Petzke et al., 1998). Cet acide aminé étant réputé limitant, notamment pour certaines céréales, cette question pourrait être intéressante à approfondir. Certaines données suggèrent que cela pourrait aussi être le cas pour la leucine (Raj et al., 2008). Le microbiote intervient également dans l'absorption des acides aminés (Lin, 2017) et pourrait expliquer certaines différences entre les sérums des végétaliens et des mangeurs.euses de viande (Prochazkova et al., 2022). La production d'acides aminés par le microbiote, ainsi que son rôle dans le métabolisme des protéines, méritent d'être encore approfondis (Newsome et al. 2020).

2.3. Utilisation des acides aminés

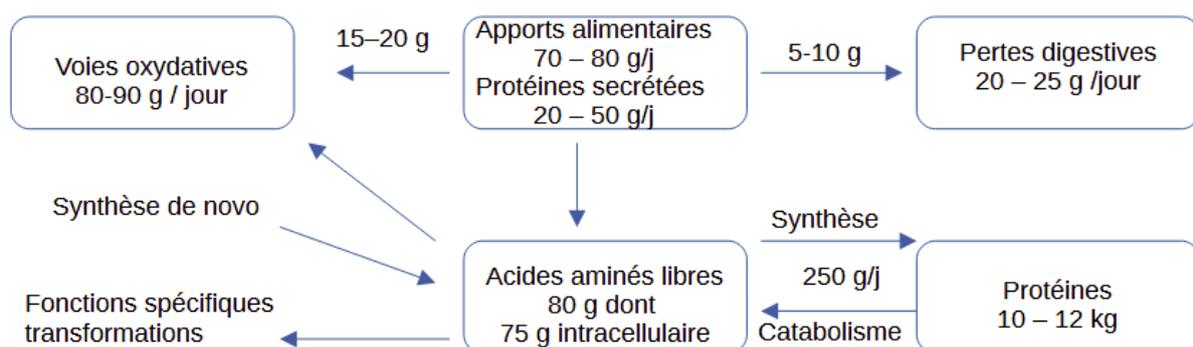
Les acides aminés servent principalement à la synthèse protéique. Celle-ci est un processus important qui se déroule de façon ininterrompue dans l'organisme. En effet, il est important

que les protéines vieillissantes soient remplacées pour garantir la continuité des fonctions qu'elles occupent.

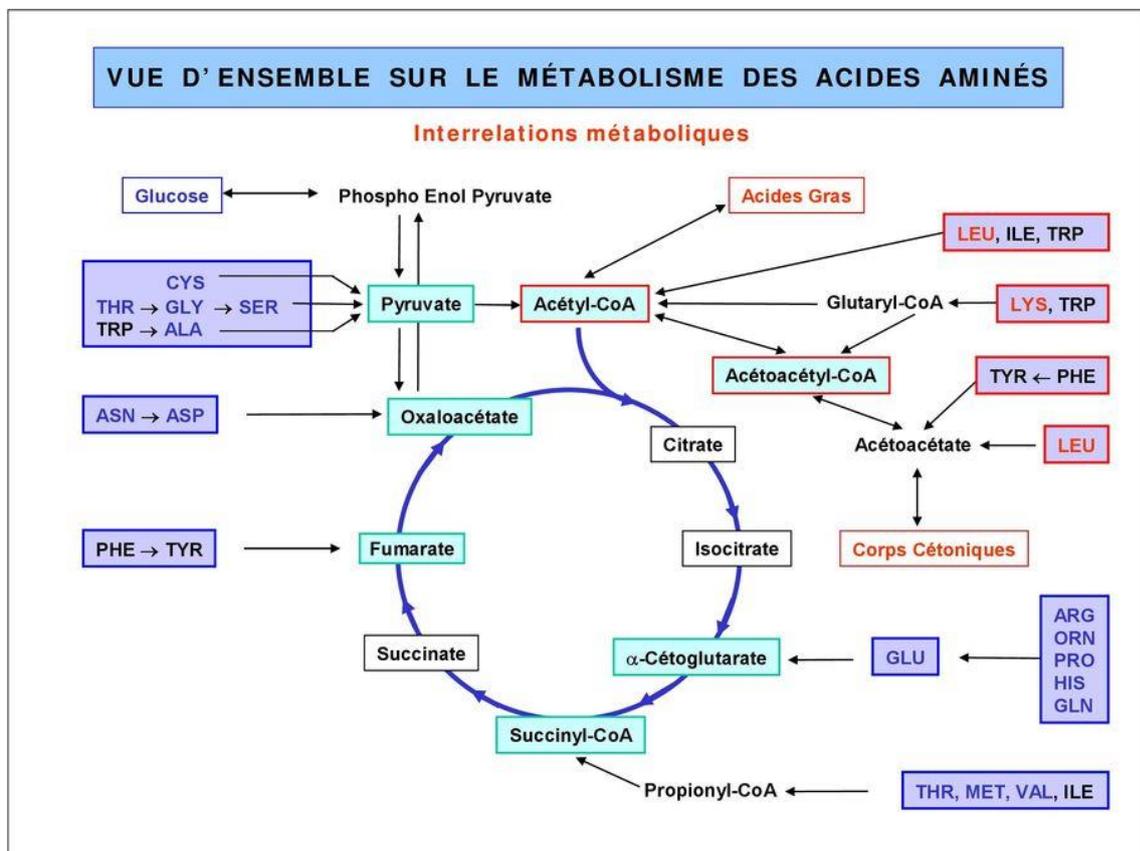
Un compartiment de « protéines labiles », de l'ordre de 80 g (soit moins de 1 % des acides aminés de l'organisme), a pu être identifié. Il est lui-même compartimenté en deux fractions, extracellulaire et intracellulaire. Cette dernière représente environ 95 % des acides aminés libres et est le véritable précurseur de la synthèse. Ce compartiment serait principalement localisé dans les tissus viscéraux. Cette réserve d'acides aminés rapidement disponibles serait ainsi comparable aux réserves de glucose sous forme de glycogène hépatique et musculaire (AFSSA 2007).

Les apports protéiques compensent les pertes d'acides aminés. La différence entre apports et pertes constitue le bilan protéique (bilan azoté) et correspond également à la différence entre synthèse et dégradation protéique à condition que la taille du pool d'acides aminés ne varie pas. Les deux phénomènes de synthèse protéique et de protéolyse sont simultanés et assurent le renouvellement protéique. L'équilibre entre synthèse et protéolyse permet la conservation de la masse protéique. En revanche, lorsque la synthèse protéique est supérieure à la protéolyse, il en résulte un gain protéique net (accrétion protéique). A l'inverse, une protéolyse supérieure à la synthèse peut entraîner une diminution de la masse protéique (Tomé, 2013).

À titre d'exemple, chez un·e adulte de 60-70 kg, les protéines représentent entre 10 et 12 kg du poids corporel. Si iel ingère 70-80 g/j de protéines (auxquelles s'ajoutent 20-50 g/j représentant des protéines endogènes sécrétés dans la lumière digestive), 5 à 10 g vont contribuer aux pertes digestives qui sont de l'ordre de 20-25 g/j au total, 15 à 20 g vont servir dans les voies d'oxydation (pour un flux total de pertes métaboliques de 80-90 g/j), et le reste va rejoindre les voies de synthèse ou vont être utilisées dans des fonctions spécifiques. La vitesse de renouvellement des protéines corporelles est en moyenne de 250 g/j pour l'ensemble de l'organisme, mais varie selon les tissus (environ 80 g/j au niveau musculaire, 120 g/j au niveau du foie, du pancréas, du tissu intestinal, des cellules sanguines et de la peau, et 50 g/j dans les autres tissus (AFSSA, 2007).



Les acides aminés participent également à la production énergétique. Ils intègrent alors le cycle de Krebs à différents endroits. Les acides aminés cétogénés sont susceptibles d'être convertis en corps cétoniques par la cétogénèse, par opposition aux acides aminés glucoformateurs qui sont, quant à eux, convertis en glucose par la néoglucogénèse. Les acides aminés cétoformateurs ne peuvent être convertis en glucose, car les deux atomes de carbone du corps cétonique sont en fin de compte dégradés en dioxyde de carbone par le cycle de Krebs.



2

Rouge : acides aminés cétogénés

Bleu : acides aminés glucoformateurs

Noir : acides aminés glucoformateurs et cétogénés

2.4. Régulation du métabolisme des protéines

L'absorption, la synthèse et la dégradation des protéines sont sous contrôle hormonal et des AA disponibles. Ces éléments varient également en fonction des périodes d'apports alimentaires.

2.4.1 Actions hormonales

L'hormone la plus importante est l'insuline. C'est une hormone anabolisante, elle augmente la synthèse protéique. Elle agit également en réduisant la protéolyse. L'apport de glucose fait augmenter la sécrétion d'insuline.

L'hormone de croissance a également un effet anabolisant, principalement en raison de son effet stimulateur sur la synthèse protéique. Les catécholamines réduisent la protéolyse ou augmentent la synthèse protéique, leurs rôles ne sont pas clairs, mais elles sont toujours anabolisantes.

Les glucocorticoïdes quant à eux sont catabolisant. Ils augmentent la protéolyse musculaire.

Un niveau moyen d'hormone thyroïdienne est nécessaire pour un bon équilibre entre synthèse et dégradation protéiques. Le glucagon semble avoir plutôt un effet catabolisant principalement au niveau splanchnique. Les cytokines sont catabolisant au niveau du muscle.

2.4.2. Actions des acides aminés

Parallèlement à ces contrôles hormonaux, il existe une régulation du métabolisme protéique par les substrats. Les acides aminés (AA) ont un effet anabolique en stimulant la synthèse protéique (Bohe et al., 2003, Nygren and Nair, 2003, Liu et al., 2002) et, dans le même temps, en inhibant la dégradation des protéines (Volpi et al., 1996, Giordano et al., 1996). Il semble que cela soit particulièrement vrai pour les AA branchés. Cependant les études à ce sujet affichent des résultats contradictoires : ainsi après la perfusion d'AA chez l'humain, la protéolyse musculaire est soit inhibée (Nygren and Nair, 2003) soit inchangée (Liu et al., 2002). L'augmentation de l'oxydation protéique augmente davantage que la synthèse en cas d'ingestion de beaucoup d'AA. Ainsi le gain protéique net rapporté aux apports est d'autant plus faible que les apports protéiques sont élevés (Goulet, 1993). Il existe également une variation en fonction de la nature des protéines digérées. Ainsi une protéine dite à digestion rapide (lactosérum par exemple) induit un gain protéique par la stimulation de la synthèse protéique. A contrario, une protéine de digestion lente (type caséine) semble plutôt induire une diminution de la protéolyse (Boirie, 1997, Dangin et al., 2002, Dangin et al., 2003). Cependant, encore une fois, les données sont contradictoires en fonction des travaux : selon certains, les protéines du lactosérum ou les protéines de soja stimulent davantage la synthèse protéique que celle de la caséine (Tang, 2009) alors que d'autres montrent une stimulation identique entre le soja et la caséine. (Luiking, 2011).

Pour complexifier encore les choses, la nature elle-même des protéines serait en mesure de modifier le métabolisme de certains organes. Ainsi, même si les protéines de soja sont plus rapidement absorbées que celle du lait, elles se retrouvent en fait temporairement moins

disponibles pour la périphérie, car elles sont dans un premier temps davantage captées par le territoire splanchnique (Fouillet et al., 2002 ; Bos al. 2003). Par ailleurs, certains acides aminés semblent avoir une fonction « signal » à part entière, comme la leucine qui stimule les protéines de signalisation impliquées dans l'initiation de la traduction protéique (Patti 1998 ; Dardevet 2000, Prod'homme et al., 2004, Kimball and Jefferson, 2005). Davantage que la leucine en elle-même, c'est le ratio entre l'apport en acides aminés essentiels et la leucine qui pourrait être déterminant (Wilkinson, 2013). La glutamine jouerait aussi un rôle dans le métabolisme protéique en freinant l'oxydation de la leucine (Hankard, 1996).

Il paraît ainsi très difficile de prédire l'effet de la consommation d'un aliment sur le métabolisme des protéines à partir de la seule composition en acide aminés de cet aliment.

Un apport énergétique suffisant est également indispensable pour obtenir un bilan azoté neutre ou positif. Les glucides semblent avoir un avantage à ce niveau sur les lipides, mais seulement en cas d'apports énergétiques limités. On note ainsi que le renouvellement protéique est énergivore et sera donc limité si l'apport énergétique l'est également. Il existe une compétition au niveau de l'oxydation des acides aminés et du glucose. Un défaut de glucose entraîne donc une oxydation plus importante des acides aminés qui ne seront plus disponibles pour la synthèse protéique. Il est possible que les acides gras à chaîne moyenne puissent activer les enzymes de dégradations des acides aminés.

2.4.3. Variations en fonction des périodes de prises alimentaires et de « jeûne »

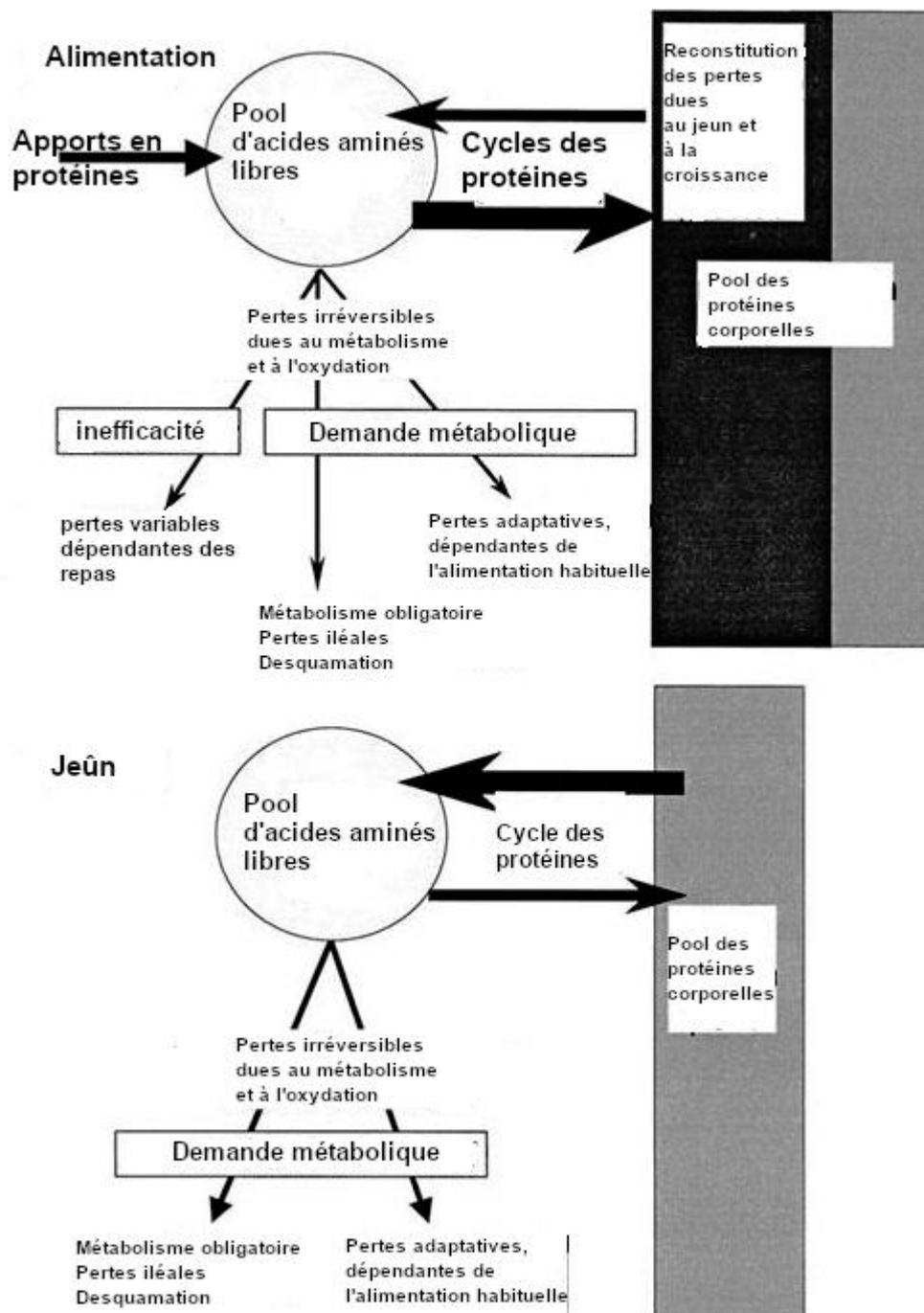
Le métabolisme protéique varie en fonction des périodes d'alimentation et de jeûne. L'état nourri dure ainsi de 3 à 6h après un repas, l'état post-absorptif entre 12 et 18h et le jeûne peut être qualifié soit de court (< 3 jours), soit de prolongé (> 3 jours).

Ainsi, lors d'un repas, l'oxydation des acides aminés (AA) dans le muscle (qui constitue un réservoir d'AA, notamment d'AA branchés) et dans le foie est maximale. Cela se traduit par une perte azotée urinaire maximale. Cette augmentation est proportionnelle aux apports protéiques, cela explique pourquoi l'augmentation des apports protéiques ne conduit pas directement à accroissement de la masse protéique de l'organisme. Le but de l'organisme étant de maintenir un bilan nul in fine. À l'état post-absorptif, la synthèse, la protéolyse et l'oxydation sont considérées être à leur niveau basal. Le bilan est négatif, car le niveau de la protéolyse est supérieur à celui de la synthèse.

À l'état post-absorptif et lors du jeûne court, la protéolyse est élevée, le muscle fournit les acides aminés pour la néo-glucogénèse et la synthèse protéique diminue. La glutamine et l'alanine représentent plus de 60 % des acides aminés libérés par le muscle (Tessari, 2000). Les acides aminés branchés fournissent près du tiers de l'azote nécessaire à cette synthèse de

novo de glutamine et d'alanine (Darmaun, 1991). Enfin au cours d'un jeûne long, l'excrétion azotée se stabilise à 50 mg/kgpc/j ce qui constitue les pertes azotées incompressibles. Le renouvellement protéique diminue. Il s'agit d'une épargne azotée relative permettant la survie longue sans manger. Par ailleurs, en cas de diminution de l'apport azoté, il existe un recyclage entéro-hépatique de l'azote permettant une économie de celui-ci (Jackson, 1995, Millward and Rivers, 1988, Nicol and Phillips, 1976, Juillet, 2006).

Chez un adulte sain, un supplément calorique de 25 % apporté sous forme glucidique accroît le gain net protéique. Ce phénomène est dû à la diminution de l'oxydation des acides aminés et à l'amélioration de la synthèse protéique (Motil, 1981).



Devenir métabolique des acides aminés par rapport à la demande métabolique et aux besoins en protéines. La demande métabolique comprend à la fois la consommation métabolique obligatoire et adaptative (fonctions transitoires des protéines, avant l'oxydation, exerçant une influence régulatrice sur le maintien et la croissance (entraînement anabolique)), qui se produit en continu tout au long de la phase postprandiale et postabsorptive du cycle quotidien. Pendant l'alimentation, l'apport alimentaire fournit la demande métabolique quotidienne en termes de pertes métaboliques obligatoires et adaptatives à l'état nourri ainsi que la réplétion des protéines tissulaires perdues pour répondre à la demande métabolique pendant la phase post-absorption du cycle diurne. Toute perte supplémentaire de l'état nourri reflète le degré d'inefficacité de l'utilisation, qui fait également partie des besoins en protéines (Millward, 1988a).

Les apports nécessaires en acide aminé ainsi que leur biodisponibilité ont fait l'objet de beaucoup d'études à la recherche de davantage de précision. Pour bien appréhender ces questions, il est important de faire un point historique avant d'aboutir aux meilleures connaissances possibles sur les besoins et les différents apports possibles en protéine animale et végétale.

3. Évaluation de la qualité des protéines alimentaires

Les premières études modernes s'intéressant à l'importance nutritionnelle des protéines datent de presque deux siècles. Il faudra attendre le début du XX^e siècle pour que la qualité des protéines soit plus spécifiquement évaluée. Depuis lors, différentes méthodes visant à appréhender cette qualité protéique ont été développées.

3.1. La qualité protéique évaluée chez l'humain : des données sans cesse révisées au cours des années

3.1.1. Avant le rapport de la FAO en 1973

Avant cette date, il est généralement admis que les protéines végétales sont de moins bonnes qualités que les protéines animales. La FAO compile les résultats de 9 études en 1973, cela marque le début d'un changement de perception. En fait, contrairement à ce qui a pu être observé préalablement chez le rat, la différence de qualité entre protéines animales et végétales ne serait pas aussi marquée lorsqu'évaluée chez l'humain. Les premières études rapportaient une qualité globale des protéines céréalières comprise entre 10 et 30 % (par

rapport aux protéines du lait ou de l'œuf). Depuis, des études menées chez l'humain ont montré une qualité des protéines céréalières comprise entre 58 et 83 %. Dans le rapport de la FAO de 1973, il est indiqué que la qualité des protéines de soja est supérieure ou égale à celle des protéines animales. C'est le début d'un changement de paradigme.

3.1.2. De 1975 aux années 2000

Dans une étude publiée en 1975, la qualité de la protéine de blé est évaluée en mesurant le bilan azoté chez seize hommes jeunes. Elle est seulement de 41 % (+/- 10 %) par rapport à celle de l'œuf (Young et al, 1975), ce qui est plutôt en désaccord avec les données retenues par le dernier rapport de la FAO de l'époque (1973) qui indique des valeurs nettement supérieures, autour de 60 %. En ce qui concerne les autres protéines végétales, les résultats sont davantage cohérents si on compare les études entre elles, avec des valeurs élevées souvent très proches de celles mesurées avec les protéines animales. Par exemple, le lupin obtient un score de 77 % par rapport à l'œuf (Egana, 1992) ce qui est tout à fait comparable à celui de la protéine de bœuf (score de 78 % par rapport à l'œuf) (Young et al. 1975). La protéine d'amarante obtient un score de 89 % par rapport aux protéines de fromage (Bressani R, 1993). Quant au soja, les protéines isolées de cette légumineuse obtiennent des scores identiques à ceux de l'œuf (soit un score de 100 %) (Young et al. 1984a et 1984b), confirmant dans le même temps qu'il s'agit de « protéines complètes » pour l'adulte, c'est-à-dire une protéine contenant tous les acides aminés en quantité suffisante pour permettre une utilisation optimale de tous les AA. Ces études confirment sans ambiguïté que la méthionine ne doit plus être considérée comme un facteur limitant des protéines de soja quand elles sont consommées chez l'adulte. De plus, tous les acides aminés n'ont pas à être disponibles lors d'un seul repas pour pouvoir être utilisés de manière optimale. Cela relativise d'autant la perception de « protéines complètes » (Young, Pellett, 1994).

3.1.3. Les études depuis les années 2000

En raison de l'existence de données contradictoires sur la qualité des protéines de céréales, de nouveaux travaux ont été entrepris afin de préciser ce point. Les travaux de Millward sur le blé indiquent des valeurs autour de 66 % par rapport au lait (Millward, 2002). Cet auteur postule que la qualité des protéines des céréales (notamment le blé) est nettement sous-évaluée si elle est obtenue dans le cadre de protocoles expérimentaux inadaptés : par exemple, si le repas précédent le protocole est très riche en protéines (Millward, 2012 et 2012bis). D'autres travaux chez l'adulte (Bos, 2005) permettent d'obtenir des valeurs encore plus élevées de 89 % (pour le blé par rapport au lait) donnant une image nettement plus qualitative des protéines issues des céréales.

Concernant les légumineuses comme les pois, le soja ou le lupin, les données récentes confirment la grande qualité de leurs protéines, très proche (95-100 % par rapport au lait) de celle des protéines animales (Fouillet, 2002 ; Mariotti, 2001 ; Mariotti, 2002).

Notons que ces études réalisées *in vivo* chez l'humain sont limitées à un nombre restreint d'aliments. De ce fait, leurs résultats pourront difficilement être utilisés si on s'intéresse à des aliments non encore évalués, à moins de transposer les résultats obtenus à d'autres aliments. Comme la pertinence d'une telle extrapolation nous paraît très discutable, nous réduisons la portée de ces valeurs aux seuls aliments effectivement testés expérimentalement.

3.1.4. Conclusion

Les études réalisées directement chez l'humain donnent des résultats nettement plus favorables aux protéines végétales que ceux obtenus initialement chez le rat. Dans le cas des légumineuses comme le lupin, le soja ou les pois, la qualité protéique est très souvent comparable (90-100 %) à celle des protéines animales. Dans le cas des céréales, même si l'évaluation de la qualité protéique est encore sujette à controverse, il semblerait que la réalité soit très éloignée des piètres valeurs enregistrées chez le rat (avec des scores moyens compris entre 10 et 30 % de ceux obtenus pour les protéines animales). Ainsi, la qualité des protéines de céréales est certainement comprise entre 70 % et 90 % (par rapport à celle des protéines animales), ce qui en fait des sources protéiques de qualité plutôt correcte.

3.2. Méthodes utilisant l'indice chimique (IC)

Parallèlement aux études *in vivo*, particulièrement complexes et coûteuses chez l'humain et occasionnant d'importants biais lorsque les résultats obtenus sur d'autres espèces animales sont extrapolés aux humains, des approches alternatives ont été développées. Elles permettent de déterminer -par le calcul- la qualité de n'importe quelle protéine. Ces méthodes utilisant l'indice chimique (IC ou AAS, pour Amino Acid Score en anglais) sont aujourd'hui très largement utilisées, car elles nécessitent uniquement de connaître la composition en acides aminés et la biodisponibilité d'une protéine.

3.2.1. Définitions de l'IC

L'IC d'une protéine correspond au plus faible score « IAAS » (Individual Amino Acid Score) obtenu pour chacun des 9 acides aminés indispensables (AAI). L'IAAS d'un AAI est calculé en divisant la quantité de cet AAI au sein d'une protéine d'intérêt par sa quantité idéale au sein de la protéine de référence. Cette protéine de référence est une construction théorique où

la proportion de chacun des AAI est considérée comme optimale chez l'humain. Cette quantité relative idéale de chacun des AAI par rapport aux autres est également appelée « profil protéique » idéal. Replacé dans le contexte métabolique, cela se traduit par une utilisation totale de l'ensemble des acides aminés non indispensables (AANI) et de chacun des AAI de la protéine de référence, car aucun n'est représenté ni en excès ni en trop faible quantité. Ce profil protéique idéal diffère fortement en fonction de l'âge considéré (réf. FAO, 2013) (du nouveau-né jusqu'à l'âge adulte) et a connu plusieurs réévaluations successives depuis sa première mise en place par l'OMS en 1973 (Tableau 2).

Date du rapport FAO	His		Ile		Leu		Lys		Souf		Arom		Thr		Trp		Val		Total AAI		
	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	mg /kg / jour	mg /g pr ot	
1973	Adulte	0	0	10	18	14	25	12	22	13	24	14	25	7	13	3,5	6,5	10	18	83,5	15,5
	Retenu	0	0	22	40	38,5	70	30	55	19	35	33	60	22	40	5,5	10	27,5	50	197,5	360
1985	Adulte	10	13	10	13	14	19	12	16	13	17	14	19	7	9	3,5	5	10	13	93,5	12,4
	Retenu	10	13	10	13	14	19	12	16	13	17	14	19	7	9	3,5	5	10	13	93,5	12,4
1991	Adulte	12	16	10	13	14	19	12	16	13	17	14	19	7	9	3,5	5	10	13	95,5	12,7
	Retenu	14	19	21	28	49,5	66	43,5	58	19	25	47	63	25,5	34	8	11	26	35	253,5	339
2007	Adulte	10	15	20	30	39	59	30	45	15	22	25	38	15	23	4	6	26	39	184	27,7
	Retenu	10	15	20	30	39	59	30	45	15	22	25	38	15	23	4	6	26	39	184	27,7
2013	Adulte	10	15	20	30	39	59	30	45	15	22	25	38	15	23	4	6	26	39	184	27,7
	Retenu	10	15	20	30	39	59	30	45	15	22	25	38	15	23	4	6	26	39	184	27,7
	TISSU	18	27	23	35	49,5	75	48	73	23	35	48	73	28	42	8	12	32	49	277,5	421

Tableau 2 : Profils protéiques de référence chez l'adulte et profils retenus pour le calcul de l'IC (rapports de l'OMS de 1973 à 2013)

À titre de comparaison, le profil protéique moyen des tissus humains est précisé dans la dernière ligne du tableau. Les besoins en AAI, exprimés en mg/kgpc/j, sont également exprimés en mg/g de protéine de référence. Cette conversion est obtenue en divisant les besoins (exprimés en mg/kgpc/j) par la quantité recommandée journalièrement (g de protéine /kgpc/j). Cette quantité recommandée varie d'un rapport à l'autre : 0,55 g/kgpc/j en 1973 ; 0,75 g/kgpc/j en 1985 ; 0,75 g/kgpc/j en 1991 ; 0,66 g/kgpc/j en 2007 ; 0,66 g/kgpc/j en 2013. Dans les rapports de 1973 et 1991, le profil protéique établi chez l'adulte n'est pas celui retenu pour le calcul de l'IC, car les données sont considérées comme peu fiables.

La qualité d'une protéine consommée de manière isolée sera considérée comme maximale si la quantité relative de chaque AAI est identique (AAIS=1) ou supérieure (AAIS>1) à celles de la protéine de référence. Les protéines dont l'IC est supérieur à 1 sont également optimales, car on suppose que leurs AAI surreprésentés seront totalement convertis en AANI. En effet, c'est précisément cette conversion des AAI excédentaires en AANI qui compensera le manque relatif de ces derniers dans un tel profil, permettant ainsi de rétablir le ratio AAI/AANI idéal de la protéine de référence (28 % AAI et 72 % AANI).

Bien que toutes les protéines alimentaires examinées, qu'elles soient d'origine animale, fongique, ou végétale, contiennent l'ensemble des AAI, une trop faible proportion d'un ou plusieurs AAI est cependant courante (voir la table composition nutritionnelle étasunienne : USDA National Nutrient Database for Standard Reference). Cela se traduit ici pour chacun des AAI sous-représentés par un score IAAS <1 conduisant donc à un IC<1 pour la protéine étudiée, puisque le plus faible score IAAS détermine celui de l'IC. L'AAI le plus déficitaire peut alors être qualifié de « limitant », car il devient le premier à manquer au cours des réactions métaboliques, limitant de ce fait l'utilisation des autres AAI pourtant encore disponibles. C'est pourquoi, plus l'IC d'une protéine sera faible, plus sa qualité pourra être qualifiée de mauvaise.

À noter que dans le cas, plus réaliste, d'un mélange protéique apporté au cours d'un ou plusieurs repas, les AAI excédentaires (ayant un score IAAS>1) pourront compenser le profil déficitaire d'une autre source protéique. Ainsi, il apparaît davantage pertinent d'évaluer un IC moyen construit à partir des différentes sources alimentaires apportées au cours de plusieurs repas plutôt qu'à partir d'une unique source protéique provenant d'un seul et même repas (Mariotti, 2017).

Comme nous venons de le voir, l'évaluation de la qualité d'une protéine à travers la mesure de son IC dépend directement de la protéine de référence choisie. Ce profil protéique

théorique est donc de première importance et a connu des corrections successives depuis sa première publication en 1973 avec l'intégration progressive de nouvelles données scientifiques.

3.2.2. Détermination du profil protéique idéal

Le premier rapport de l'OMS proposant l'évaluation de la qualité d'une protéine à partir du calcul de son IC date de 1973. Depuis lors, plusieurs profils protéiques théoriques de référence ont été successivement construits, permettant de progressivement consolider cette approche.

3.2.2.1. Le rapport de 1973

Si un premier profil protéique idéal est déjà établi en 1957 par un comité d'expert de l'OMS, il faudra attendre le prochain rapport de 1973 pour qu'une telle protéine de référence soit effectivement utilisée comme outil d'évaluation de la qualité protéique (réf. FAO 1973). Dans ce rapport, trois profils différents sont proposés en fonction de l'âge concerné (bébé de 0 à 6 mois, enfant de 10-12 ans, adulte âgé de plus de 18 ans). Si la robustesse des données scientifiques est encore largement discutée et discutable, ce rapport montre déjà clairement que les besoins relatifs en AAI décroissent avec l'âge, donnée qui sera confirmée par l'OMS dans ses comptes rendus suivants. Il convient de préciser le choix des auteurs de retenir pour le calcul de l'IC un unique profil protéique de référence. Ce dernier est proche de celui de l'enfant en bas âge, car les auteurs considèrent que les données recueillies chez l'adulte sont trop incertaines ([Tableau 1](#)). De ce fait, l'emploi de ce profil de référence apparaît inadapté pour évaluer précisément l'IC d'une protéine chez l'adulte même s'il permet de discuter concrètement de la notion d'acide aminé limitant. Peu après, des études (réalisées *in vivo* chez l'humain) sur le soja semblent plutôt rejeter ce choix de profil protéique et de valider au contraire le profil protéique adulte. Par exemple, la quantité de méthionine proposée dans le profil retenu dans le rapport apparaît bien trop élevée (19,5 mg de méthionine/kgpc). En effet, [Zezulka et al.](#) ont montré (*in vivo* chez l'humain) que les besoins en méthionine étaient entièrement couverts chez l'ensemble des personnes étudiées avec une consommation inférieure ou égale à 13 mg/kgpc⁶, comme le propose le profil protéique adulte de 1973 ([Zezulka et al., 1976](#)).

⁶ De plus, ces études démontrent que la méthionine ne constitue pas un acide aminé limitant chez la protéine de soja puisqu'elle apporte au moins ces 13 mg de méthionine/kgpc si elle est consommée à hauteur de 0,55 g/kgpc/j (correspondant au niveau de sécurité fixé en 1973). Parallèlement à ces travaux sur le soja, d'autres études semblent montrer que la lysine est un acide aminé limitant des céréales puisqu'une supplémentation améliore la rétention métabolique de l'azote ([Bailey et Clark, 1976](#)). Cependant, ces résultats ne valident pas

3.2.2.2. Les rapports de 1985 et 1991

En 1985, le profil protéique adulte a été retenu pour le calcul de l'IC (à la différence du précédent rapport de 1973). Pour ce faire, les données utilisées précédemment sont réinvesties en ajoutant l'histidine à la liste des 8 autres AAI et en intégrant les nouvelles données expérimentales. Par exemple, pour la méthionine, les travaux de Zezulka confirment le niveau des besoins établis en 1973 (Zezulka et al., 1976). De plus, le comité de 1985 suppose un besoin protéique global de sécurité plus élevé (cette valeur passe de 0,55 à 0,75 g/kgpc/j) ce qui modifie sensiblement le profil protéique idéal exprimé en mg d'AAI/g de protéine (Tableau 2). La composition en AAI devient donc beaucoup moins exigeante⁷.

Comparée aux données obtenues par d'autres méthodes d'évaluation, l'utilisation de ce profil protéique ne semble pas satisfaisante puisqu'il conduit à surestimer fortement la qualité protéique. En effet, plusieurs travaux dénoncent des besoins sous-estimés dans le cas de plusieurs AAI (Meguid MM et al, 1986 et 1986bis ; FAO, 1991). En fait, de nombreux scientifiques pointeront, *a posteriori*, des erreurs d'analyse expliquant les très faibles proportions en AAI du profil protéique retenu en 1985 (Millward, 2012 et 2012bis).

En attendant une correction de ces biais méthodologiques à partir de nouvelles données, le nouveau rapport de 1991 (FAO/WHO, 1991) décide d'invalider le profil adulte de 1985 pour le remplacer par celui des enfants âgés de 2 à 5 ans, car il apparaît beaucoup plus fiable. Chez l'adulte, l'utilisation de ce profil (établi chez l'enfant) conduit à une forte sous-estimation de la qualité des protéines consommées. Ce point est clairement assumé et justifié dans le rapport de 1991 par le fait qu'une telle sous-estimation est préférable à la surestimation de la qualité de certaines protéines, notamment végétales.

3.2.2.3. Les rapports de 2007 et 2013

Le profil protéique retenu en 1985 ayant occasionné d'importantes critiques, une nouvelle évaluation intégrant les nouveaux travaux réalisés depuis lors est proposée en 2007 (FAO/WHO, 2007). Il faut cependant noter que les besoins retenus dans le rapport de 2007 correspondent à la fourchette haute des valeurs mesurées pour chacun des AAI, notamment pour la lysine, ce qui se traduit par un profil protéique adulte contenant deux fois plus d'AAI que celui de 1985 (Tableau 1). Dans ce contexte, on peut se demander si le comité n'a pas, dans ce cas, volontairement surestimé les besoins en AAI, comme il les avait fortement sous-estimés en 1985 ?

forcément un fort déficit en lysine dans le profil protéique des céréales, car une mauvaise biodisponibilité de la lysine pourrait également les expliquer, au moins partiellement.

⁷ Par exemple, les besoins en Lysine et AA soufrés, passent respectivement de 22 et 24 mg/g de protéine (en 1973) à seulement 16 et 17 mg/g de protéine (en 1985).

En 2011, une dernière révision a donné lieu à de nouvelles recommandations pour les enfants, mais le profil adulte est resté inchangé (FAO, 2013). Peu après, de nouveaux travaux (Millward, 2012 bis) conduisent à proposer une révision du profil protéique adulte avec notamment une plus faible proportion en lysine (Tableau 1).

Par ailleurs, compte tenu de la façon dont les besoins en AAI ont été déterminés dans le rapport 2007, il est raisonnable de considérer qu'ils correspondent à des valeurs de sûreté⁸ et non pas à des valeurs moyennes (0,66 g de protéine / kg de masse corporelle / jour) comme indiquées dans ce rapport. Ce point de vue partagé par certains scientifiques est d'ailleurs discuté dans le rapport de 2013 sans pour autant qu'il en soit tenu compte⁹ pour construire de nouvelles recommandations (Millward, 2012). Interpréter les besoins en AAI comme des valeurs de sûreté conduit au calcul d'un nouveau profil protéique idéal adapté à une consommation protéique de sûreté : 0,83 g/kgpc/j.

3.2.2.4. Conclusion

Il s'est écoulé près de 50 ans depuis la date du premier profil protéique adulte en 1973. À noter que ces profils de référence diffèrent fortement de celui pouvant être déduit à partir de la composition protéique corporelle moyenne (ligne « tissu » dans le tableau 1). Cette contradiction apparente s'explique par le fait que le niveau de la demande métabolique n'est pas le même pour les différents AAI, conduisant à des besoins relatifs pour chaque AAI très différents les uns des autres et variables en fonction de l'état physiologique (Millward, 1999). Autrement dit, la chair humaine n'est pas la meilleure source protéique pour maintenir l'intégrité des tissus du corps humain !

Ce n'est que depuis une vingtaine d'années que des données suffisamment solides ont permis d'affiner ce profil afin de rendre opérationnelle son utilisation chez l'adulte. Cependant, le dernier profil protéique adulte de 2007 est également critiquable car il considère que les besoins en AAI représentent des valeurs moyennes alors qu'il nous paraît davantage pertinent de les considérer comme des valeurs de sûreté. De plus, comme le montrent des derniers travaux de Millward, une révision du profil protéique de 2007 semble nécessaire, car il conduit à sous-estimer fortement l'IC de nombreuses protéines, notamment celle des céréales (Millward et al., 2002 ; Millward, 2012 bis).

⁸ Les valeurs moyennes sont en fait des valeurs médianes, couvrant les besoins de 50 % de la population, alors que les valeurs de sûreté permettent de couvrir les besoins de 97,5 % d'une population.

⁹ Depuis 1973, la détermination des profils protéiques de référence nécessite de choisir entre plusieurs résultats expérimentaux pouvant être relativement éloignés les uns des autres. En cas d'incertitude, ce choix est guidé par le postulat voulant qu'un risque de carence est davantage préjudiciable pour la santé que le contraire. Ceci explique pourquoi l'utilisation de ces profils protéiques a souvent été à l'origine d'une sous-estimation de la qualité des protéines consommées, surtout chez les adultes pour lesquels était privilégié un profil protéique trop exigeant établi à partir de données expérimentales recueillies chez les enfants.

Acides Aminés Indispensables (AAI)	mg d'AAI pour 1g de protéine de référence		OMS 2007 corrigé*	Millward 2012
	OMS 2007			
<i>Histidine (His)</i>	15		12	12
<i>Isoleucine (Iso)</i>	30		24	22
<i>Leucine (Leu)</i>	59		47	31
<i>Lysine (Lys)</i>	45		36	23
Méthionine + Cystéine = Soufrés (Souf)	22		18	19
<i>Phénylalanine + Tyrosine = Aromatiques (Arom)</i>	38		30	24
<i>Thréonine (Thr)</i>	23		18	19
<i>Tryptophane (Trp)</i>	6		5	5
<i>Valine (Val)</i>	39		31	17
Total	277		221	196

Afin de présenter l'impact de ces trois interprétations sur l'évaluation de la qualité des protéines végétales, nous avons calculé leurs IC en utilisant ces trois profils protéiques théoriques de référence (Tableau 2).

3.2.3. Calcul de l'IC

Le calcul de l'IC pour les différents aliments choisis permet d'apprécier la qualité du profil en AAI des protéines qu'ils contiennent. Pour ce faire, le profil protéique moyen d'un aliment est comparé avec le profil protéique idéal tel que déterminé précédemment. Compte tenu des incertitudes entourant la détermination de cette protéine idéale, trois profils de référence ont été retenus pour calculer l'IC des différents aliments examinés (tableaux 3, 4 et 4bis).

Tableau 3 : Profils protéiques de référence

Trois profils de référence sont présentés :

1. Le profil protéique de référence proposé par le comité OMS en 2007 ;
2. Le profil proposé par l'OMS en 2007 après correction c'est-à-dire en considérant que les besoins en AAI représentent des valeurs de sûreté* plutôt que des valeurs moyennes/médianes* ;
3. Le profil proposé par Millward en 2012 (Millward et al., 2012) en considérant que les besoins en AAI représentent des valeurs de sûreté.

Tableau 4 : Calcul des IC de quelques aliments

Pour les calculs, les trois profils protéiques idéaux établis dans le tableau 1 sont utilisés :

1. Le profil établi par l'OMS en 2007 ;
2. Une correction du profil OMS de 2007* en considérant que les besoins en AAI représentent des valeurs de sûreté ;
3. Le profil établi par Millward en 2012.

Nous avons choisi des protéines représentatives des principaux groupes consommés au sein d'une alimentation végétale : céréales, légumineuses, fruits et légumes, fruits à coque et quelques produits d'origine animale. Quand disponibles, les valeurs sont données pour le mode de consommation (cuit ou cru) le plus courant. Les données sont extraites de la banque de données américaine : USDA database Release 28. Le ou les AAI avec le plus petit score est(sont) indiqué(s) entre parenthèses. Quand ce score est inférieur à 1 (facteur limitant de la protéine), le chiffre est écrit en rouge.

Un code couleur[§] est utilisé pour faciliter l'analyse de la densité protéique calculée ($D_{prot} = g \text{ de protéine} / 100 \text{ Calories}$) :

1. En rouge : $D_{prot} < 2g / 100 \text{ Cal}$ (densité protéique très faible)
2. En orange : $2g / 100 \text{ Cal} < D_{prot} < 2,5g / 100 \text{ Cal}$ (densité protéique faible)
3. En vert : $2,5g / 100 \text{ Cal} < D_{prot} < 5g / 100 \text{ Cal}$ (densité protéique moyenne)
4. En vert gras : $5g / 100 \text{ Cal} < D_{prot} < 10g / 100 \text{ Cal}$ (densité protéique forte)
5. En bleu gras : $D_{prot} > 10g / 100 \text{ Cal}$ (densité protéique très forte)

Aliment		Indice Chimique			% protéine	Calories / 100g	Densité protéique g protéine/100 Calories	
		OMS 2007	OMS 2007 corrigé*	Millward 2012				
Légumineuses	Brutes	Soja (graines bouillies)	1,23 (Souf)	1,50 (Souf)	1,42 (Souf)	18,2	172	10,6
		Pois chiche (bouillis)	1,20 (Souf)	1,47 (Souf)	1,39 (Souf)	8,9	164	5,4
		Haricots Blancs (bouillis)	1,18 (Souf)	1,44 (Souf)	1,37 (Souf)	9,7	139	7
		Pois (bouillis)	1,16 (Souf)	1,42 (Souf)	1,34 (Souf)	8,3	118	7
		Haricots verts (bouillis)	0,99 (Souf)	1,21 (Souf)	1,14 (Souf)	1,9	35	5,4
		Lentilles vertes (bouillies)	0,98 (Souf)	1,20 (Souf)	1,14 (Souf)	9	116	7,8
		Haricots Adzuki (bouillis)	0,90 (Souf)	1,10 (Souf)	1,04 (Souf)	7,5	128	5,9
		Lupin (bouilli)	0,83 (Souf)	1,01 (Souf)	0,96 (Souf)	15,6	119	13,1
	Transformées	Protéines de soja (sèches)	1,12 (Souf)	1,37 (Souf)	1,29 (Souf)	88,3	335	26,4
		Tofu soyeux (nigari)	1,11 (Souf)	1,36 (Souf)	1,28 (Souf)	7,2	61	11,8
		Tempeh	0,82 (Souf)	1,01 (Souf)	0,95 (Souf)	20,3	192	10,6
Tofu ferme (nigari)		0,77 (Souf)	0,94 (Souf)	0,89 (Souf)	12,7	145	8,8	
	Tofu ferme (Sulfate Calcium)	0,70 (Souf)	0,86 (Souf)	0,82 (Souf)	17,3	144	12	
Céréales (et Grains)	Sarrasin (farine)	1,06 (Leu)	1,33 (Leu)	2,02 (Leu)	12,6	335	3,8	
	Quinoa (bouilli)	0,97 (Leu)	1,22 (Leu)	1,52 (Thr)	4,4	120	3,7	
	Avoine (grains entiers)	0,92 (Lys)	1,15 (Lys)	1,80 (Lys)	16,9	389	4,3	
	Maïs (grains entiers cuits)	0,92 (Lys)	1,15 (Lys)	1,80 (Lys)	3,4	96	3,6	
	Riz Blanc ou Brun (bouilli)	0,80 (Lys)	1,00 (Lys)	1,57 (Lys)	2,7	130	2,1	

Fruits à coque	A	Oléagineuse	<i>Triticale** (farine)</i>	0,62 (Lys)	0,78 (Lys)	1,22 (Lys)	13,2	338	3,9
			<i>Seigle (farine complète)</i>	0,47 (Lys)	0,58 (Lys)	0,91 (Lys)	15,9	325	4,9
			<i>Blé (farines diverses)</i>	0,47 (Lys)	0,58 (Lys)	0,91 (Lys)	10/12/2 2	361	3
			<i>Millet (bouilli)</i>	0,42 (Lys)	0,53 (Lys)	0,83 (Lys)	3,5	119	2,9
	Germ	<i>Germe de blé (cru)</i>	1,15 (Leu)	1,45 (Leu)	2,05 (Leu)	23,1	360	6,4	
		<i>Son de riz (cru)</i>	1,08 (Lys)	1,35 (Lys)	2,12 (Lys)	13,3	316	4,2	
		<i>Son de blé (cru)</i>	0,86 (Lys)	1,07 (Lys)	1,68 (Lys)	15,6	216	7,2	
		<i>Pistaches (cruces)</i>	1,27 (Lys)	1,58 (Lys)	1,68 (Souf)	20,2	560	3,6	
		<i>Noix de cajou (cruces)</i>	1,13 (Lys)	1,42 (Lys)	1,95 (Iso)	18,2	553	3,3	
		<i>Noix de Grenoble (cruces)</i>	0,61 (Lys)	0,77 (Lys)	1,20 (Lys)	15,2	654	2,3	
Légumes (et assimilés)	A	Feuilles et fleurs	<i>Noisettes (cruces)</i>	0,62 (Lys)	0,78 (Lys)	1,22 (Lys)	15	628	2,4
			<i>Amandes (cruces)</i>	0,60 (Lys)	0,75 (Lys)	0,92 (Souf)	21,1	579	3,6
			<i>Châtaignes (grillées)</i>	1,02 (Leu)	1,28 (Leu)	1,73 (Iso)	3,2	245	1,3
			<i>Epinards (bouillis)</i>	1,32 (Leu)	1,66 (Leu)	2,25 (Thr)	3	23	13
			<i>Spiruline (algue fraîche)</i>	1,17 (Lys)	1,46 (Lys)	1,57 (His)	5,9	26	22,7
			<i>Choux verts « kale » (cuits)</i>	1,03 (Souf)	1,26 (Souf)	1,19 (Souf)	1,9	28	6,8
			<i>Algues cultivée Emi-Tsunomata</i>	1,00 (Leu/His)	1,26 (Leu/His)	1,25 (His)	1,9	31	6,1
			<i>Chou-fleur (cuit)</i>	0,99 (Leu)	1,24 (Leu)	1,35 (Souf)	1,8	23	7,8
			<i>Salade verte (laitue crue)</i>	0,98 (Leu)	1,24 (Leu)	1,24 (Souf)	1,4	15	9,1
			<i>Brocoli (cru)</i>	0,74 (Leu)	0,93 (Leu)	0,94 (Souf)	3	28	10,7
Racines,	<i>Choux de Bruxelles (cuits)</i>	0,71 (Souf)	0,87 (Souf)	0,83 (Souf)	2,6	36	7,2		
	<i>Oignon (bouilli)</i>	0,58 (Val)	0,74 (Val)	1,14 (Leu)	1,4	44	3,2		
	<i>Choux rouge (crus)</i>	0,55 (Leu)	0,69 (Leu)	0,96 (Souf)	1,4	31	4,5		
	<i>Carottes (crue)</i>	1,87 (Leu)	2,34 (Leu)	2,52 (Trp)	0,9	41	2,2		
	<i>Pom. de terre sans peau (bouillies)</i>	1,01 (Leu)	1,27 (Leu)	1,52 (Souf)	1,9	87	2,2		
	<i>Aubergines (bouillies)</i>	0,72 (Souf)	0,88 (Souf)	0,84 (Souf)	0,8	35	2,3		
	<i>Poivrons (crus)</i>	0,61 (Leu)	0,77 (Leu)	0,95 (Iso)	1	31	3,2		
	<i>Courgettes (cuites)</i>	0,55 (Leu)	0,69 (Leu)	0,69 (Thr)	1,1	15	7,3		
	<i>Tomates rouges (cruces)</i>	0,48 (Leu)	0,60 (Leu)	0,89 (Souf)	0,9	18	5		
	<i>Champignons (cru)</i>	0,48 (Leu)	0,60 (Leu)	0,89 (Souf)	0,9	18	5		
Fruits (sucrés)	A	Baies	<i>Airelles (cruces)</i>	0,59 (Souf)	0,72 (Souf)	0,68 (Souf)	0,5	46	1,1
			<i>Fraises (cruces)</i>	0,54 (Souf)	0,66 (Souf)	0,63 (Souf)	0,7	32	2,2
			<i>Myrtilles (cruces)</i>	0,39 (Lys)	0,49 (Lys)	0,77 (Lys)	0,7	57	1,2
	Autres fruits	<i>Banane (crue)</i>	0,86 (Iso)	1,07 (Iso)	1,17 (Iso)	1,1	89	1,2	
		<i>Pommes (cruces)</i>	0,64 (Arom)	0,81 (Arom)	0,96 (Iso)	0,3	52	0,6	
		<i>Oranges (cruces)</i>	0,42 (Leu)	0,52 (Leu)	0,79 (Leu)	0,9	47	1,9	
Champignons	<i>Abricots (crus)</i>	0,30 (Souf)	0,36 (Souf)	0,34 (Souf)	1,4	48	2,9		
	<i>Portobello / de Paris (cru)</i>	0,85 (Souf)	1,04 (Souf)	0,99 (Souf)	2,1	22	9,5		
	<i>Portobello / de Paris (grillé)</i>	0,75 (Souf)	0,92 (Souf)	0,87 (Souf)	3,3	29	11,4		
D'origine animale	<i>Shitaké (cuit)</i>	0,45 (Trp)	0,54 (Trp)	0,54 (Trp)	1,6	56	2,9		
	<i>Lait entier de vache</i>	1,47 (Souf)	1,80 (Souf)	1,71 (Souf)	3,1	61	5,1		
	<i>Oeuf de poule entier et cuit (dur)</i>	1,45 (Leu)	1,60 (Leu)	1,98 (His)	12,6	155	8,1		
	<i>Poissons blancs (mélange cuit)</i>	1,32 (Val)	1,66 (Val)	2,10 (Iso)	24,5	172	14,2		
	<i>Poulet (viande rôtie, sans peau)</i>	1,27 (Leu/Val)	1,73 (Leu/Val)	2,13 (Souf)	28,9	190	15,2		
<i>Boeuf 20% MG (viande cuite)</i>	0,85 (Trp)	1,02 (Trp)	1,02 (Trp)	25,2	254	9,9			

***La triticale ou épeautre est une céréale hybride entre le blé et le seigle*

§Le choix des seuils utilisés s'explique ainsi :

*Une densité protéique (Dprot) est considérée comme **moyenne** si :*

- *Dprot > la limite inférieure de l'Anses (2016) = 10 % AET (= 2,5g /100 Cal)*
- *Dprot < la limite supérieure de l'Anses (2016) = 20 % AET (= 5g /100 Cal)*

*Une densité protéique est considérée comme **faible à très faible** si :*

- *Dprot < à la limite inférieure de l'Anses (2016) = 10 % AET (= 2,5g /100 Cal) : Dprot faible*
- *Dprot < 8 % AET (= 2g /100 Cal) : Dprot très faible*

*Une densité protéique est considérée comme **forte à très forte** si :*

- *Dprot > à la limite supérieure de l'Anses (2016) = 20 % AET (= 5g /100 Cal) : Dprot forte*
- *Dprot > 40% AET (= 10g /100 Cal) : Dprot très forte*

Tableau 4bis : IC moyens des différents groupes alimentaires

Pour les calculs, les trois profils protéiques idéaux établis dans le tableau B1 sont utilisés :

1. Le profil établi par l'OMS en 2007 ;
2. Une correction du profil OMS de 2007* en considérant que les besoins en AAI représentent des valeurs de sûreté ;
3. Le profil établi par Millward en 2012.

Nous avons choisi des protéines représentatives des principaux groupes consommés au sein d'une alimentation végétale : céréales, légumineuses, fruits et légumes, noix et quelques produits d'origine animale. Quand disponibles, les valeurs sont données pour le mode de consommation (cuit ou cru) le plus courant. Les données sont extraites de la banque de données américaine : USDA database Release 28. Le ou les AAI avec le plus petit score est(sont) indiqué(s) entre parenthèses. Quand ce score est inférieur à 1 (facteur limitant de la protéine), le chiffre est écrit en **rouge**.

Un code couleur[§] est utilisé pour faciliter l'analyse de la densité protéique calculé (Dprot= g de protéine / 100 Calories) :

- En rouge : Dprot < 2g / 100 Cal (densité protéique très faible) ;
- En orange : 2g / 100 Cal < Dprot < 2,5g / 100 Cal (densité protéique faible) ;

- En vert : 2,5g / 100 Cal < Dprot < 5g / 100 Cal (densité protéique moyenne)
 en vert gras : 5g / 100 Cal < Dprot < 10g / 100 Cal (densité protéique forte)
 en bleu gras : Dprot > 10g / 100 Cal (densité protéique très forte).

		Aliment	Indice Chimique			% protéine	Calories /100g	Densité protéique g protéine/100 Calories		
			OMS 2007	OMS corrigé*	Millward 2012			Moyenne	Moyenne	
Légumineuses	Brutes cuites	Pois chiche	1,20 (Souf)	1,47 (Souf)	1,39 (Souf)	8,9	164	130 (143 en excluant haricot)	5,4	7,25 (7,5 en excluant haricot)
		Haricot Blanc	1,18 (Souf)	1,44 (Souf)	1,37 (Souf)	9,7	139		7	
		Pois	1,16 (Souf)	1,42 (Souf)	1,34 (Souf)	8,3	118		7	
		Haricot vert	0,99 (Souf)	1,21 (Souf)	1,14 (Souf)	1,9	35		5,4	
		Lentille verte	0,98 (Souf)	1,20 (Souf)	1,14 (Souf)	9	116		7,8	
		Haricot Adzuki	0,90 (Souf)	1,10 (Souf)	1,04 (Souf)	7,5	128		5,9	
	Transfor mées	Tempeh	0,82 (Souf)	1,01 (Souf)	0,95 (Souf)	20,3	192		10,6	
		Tofu	0,77 (Souf)	0,94 (Souf)	0,89 (Souf)	12,7	145		8,8	
Céréales (et assimilé)	Grains entiers ou farine	Sarrasin (farine)	1,06 (Leu)	1,33 (Leu)	2,02 (Leu)	12,6	335	246	3,8	3,6
		Quinoa (bouilli)	0,97 (Leu)	1,22 (Leu)	1,52 (Thr)	4,4	120		3,7	
		Avoine (grain)	0,92 (Lys)	1,15 (Lys)	1,80 (Lys)	16,9	389		4,3	
		Maïs (grain cuit)	0,92 (Lys)	1,15 (Lys)	1,80 (Lys)	3,4	96		3,6	
		Riz (bouilli)	0,80 (Lys)	1,00 (Lys)	1,57 (Lys)	2,7	130		2,1	
		Triticale** (farine)	0,62 (Lys)	0,78 (Lys)	1,22 (Lys)	13,2	338		3,9	
		Seigle (farine complète)	0,47 (Lys)	0,58 (Lys)	0,91 (Lys)	15,9	325		4,9	
		Blé (farines diverses)	0,47 (Lys)	0,58 (Lys)	0,91 (Lys)	10/12/22	361		3	
		Millet (bouilli)	0,42 (Lys)	0,53 (Lys)	0,83 (Lys)	3,5	119		2,9	
Fruits à coque	Crus	Pistache	1,27 (Lys)	1,58 (Lys)	1,68 (Souf)	20,2	560	595	3,6	3
		Noix de cajou	1,13 (Lys)	1,42 (Lys)	1,95 (Iso)	18,2	553		3,3	
		Noix de Grenoble	0,61 (Lys)	0,77 (Lys)	1,20 (Lys)	15,2	654		2,3	
		Noisette	0,62 (Lys)	0,78 (Lys)	1,22 (Lys)	15	628		2,4	
		Amande	0,60 (Lys)	0,75 (Lys)	0,92 (Souf)	21,1	579		3,6	
Légumes (Et	Feuilles et fleurs	Epinard (bouilli)	1,32 (Leu)	1,66 (Leu)	2,25 (Thr)	3	23	26	13	8,4
		Chou « kale » (cuit)	1,03 (Souf)	1,26 (Souf)	1,19 (Souf)	1,9	28		6,8	

Racines, tubercules et fruits (non sucrés)	Chou-fleur (cuit)	0,99 (Leu)	1,24 (Leu)	1,35 (Souf)	1,8	23	38 (28 en excluant pom. de terre)	7,8	3,7 (4 en excluant pom. de terre)	
	Laitue (cru)	0,98 (Leu)	1,24 (Leu)	1,24 (Souf)	1,4	15		9,1		
	Brocoli (cru)	0,74 (Leu)	0,93 (Leu)	0,94 (Souf)	3	28		10,7		
	Chou Bruxelles (cuit)	0,71 (Souf)	0,87 (Souf)	0,83 (Souf)	2,6	36		7,2		
	Chou rouge (cru)	0,55 (Leu)	0,69 (Leu)	0,96 (Souf)	1,4	31		4,5		
	Carotte (cru)	1,87 (Leu)	2,34 (Leu)	2,52 (Trp)	0,9	41	38 (28 en excluant pom. de terre)	2,2		
	Pom. de terre (bouillie)	1,01 (Leu)	1,27 (Leu)	1,52 (Souf)	1,9	87		2,2		
	Aubergine (bouillie)	0,72 (Souf)	0,88 (Souf)	0,84 (Souf)	0,8	35		2,3		
	Poivron (cru)	0,61 (Leu)	0,77 (Leu)	0,95 (Iso)	1	31		3,2		
	Courgette (cuite)	0,55 (Leu)	0,69 (Leu)	0,69 (Thr)	1,1	15		7,3		
	Tomate rouge (cru)	0,48 (Leu)	0,60 (Leu)	0,89 (Souf)	0,9	18		5		
Fruits (sucrés)	Baies crues	Airelle	0,59 (Souf)	0,72 (Souf)	0,68 (Souf)	0,5	53	1,1	1,6	
		Fraise	0,54 (Souf)	0,66 (Souf)	0,63 (Souf)	0,7		32		2,2
		Myrtille	0,39 (Lys)	0,49 (Lys)	0,77 (Lys)	0,7		57		1,2
	Autres fruits crus	Banane	0,86 (Iso)	1,07 (Iso)	1,17 (Iso)	1,1		89		1,2
		Pomme	0,64 (Arom)	0,81 (Arom)	0,96 (Iso)	0,3		52		0,6
		Orange	0,42 (Leu)	0,52 (Leu)	0,79 (Leu)	0,9		47		1,9
		Abricot	0,30 (Souf)	0,36 (Souf)	0,34 (Souf)	1,4		48		2,9
Champignons	Ch. de Paris (grillé)	0,75 (Souf)	0,92 (Souf)	0,87 (Souf)	3,3	29	43	11,4	7,2	
	Shitaké (cuit)	0,45 (Trp)	0,54 (Trp)	0,54 (Trp)	1,6	56		2,9		
D'origine animale	Lait entier de vache	1,47 (Souf)	1,80 (Souf)	1,71 (Souf)	3,1	61	166 (193 en excluant lait)	5,1	10,5 (11,9 en excluant lait)	
	Œuf entier « dur »	1,45 (Leu)	1,60 (Leu)	1,98 (His)	12,6	155		8,1		
	Poisson blanc (cuit)	1,32 (Val)	1,66 (Val)	2,10 (Iso)	24,5	172		14,2		
	Poulet (rôti sans peau)	1,27 (Leu/Val)	1,73 (Leu/Val)	2,13 (Souf)	28,9	190		15,2		
	Bœuf 20% MG (cuit)	0,85 (Trp)	1,02 (Trp)	1,02 (Trp)	25,2	254		9,9		

**La triticales ou épeautre est une céréale hybride entre le blé et le seigle

§ Le choix des seuils utilisés s'explique ainsi :

Une densité protéique (Dprot) est considérée comme **moyenne** si :

- Dprot > la limite inférieure de l'Anses (2016) = 10 % AET (= 2,5g /100 Cal)

- $D_{prot} < \text{la limite supérieure de l'Anses (2016)} = 20 \% \text{ AET} (= 5g / 100 \text{ Cal})$

Une densité protéique est considérée comme **faible à très faible** si :

- $D_{prot} < \text{à la limite inférieure de l'Anses (2016)} = 10 \% \text{ AET} (= 2,5g / 100 \text{ Cal})$: *D_{prot} faible*
- $D_{prot} < 8 \% \text{ AET} (= 2g / 100 \text{ Cal})$: *D_{prot} très faible*

Une densité protéique est considérée comme **forte à très forte** si :

- $D_{prot} > \text{à la limite supérieure de l'Anses (2016)} = 20 \% \text{ AET} (= 5g / 100 \text{ Cal})$: *D_{prot} forte*
- $D_{prot} > 40 \% \text{ AET} (= 10g / 100 \text{ Cal})$: *D_{prot} très forte*

Sans surprise, les produits animaux apparaissent comme d'excellentes sources de protéines. Ils présentent des IC supérieurs à 1 et de bonnes teneurs en protéines. Les chairs animales sont extrêmement riches en protéines (24,5 - 28,9 %). Les œufs ont une teneur protéique plutôt élevée (12,6 %) alors que le lait de vache en est plus pauvre (3,1 %).

Les préparations à base de soja comme le tempeh et le tofu ont un profil légèrement dégradé (déficient en acides aminés soufrés) par rapport à la graine ou aux protéines de soja (extraites de la farine de soja déshuilée à froid). Si l'on prend garde de varier les sources, avancer un déficit relatif en acides aminés soufrés au sein des légumineuses nous apparaît donc totalement injustifié. De plus, la forte teneur protéique des légumineuses (entre 7 et 18 % pour les graines entières) en fait une source de tout premier choix pour les alimentations végétales.

Certains fruits à coque (pistaches, noix de cajou, etc.) et céréales comme le sarrasin, le quinoa (ces derniers étant souvent assimilés à des céréales dans leurs usages alimentaires), l'avoine ou le riz présentent des profils protéiques de très bonne qualité (IC >1 ou proche de 1, en fonction de la protéine de référence choisie). D'autres, comme les amandes, les noix de Grenoble, le maïs, le blé, le seigle ou le millet, obtiennent de scores de piètres qualités ($0,42 < IC < 0,62$) s'ils sont calculés à partir de la protéine de référence établie en 2007 par la FAO. Ces faibles IC sont incohérents si on les compare avec les différentes mesures réalisées *in vivo* chez l'humain (la qualité protéique des céréales y est en moyenne évaluée à 0,7 - 0,9 par rapport aux protéines animales. Ce mode de calcul de l'IC semble donc fortement surestimer les besoins humains en certains AAI comme la Lysine (Millward et al, 2002 ; Millward, 2012bis). Ainsi, la protéine de référence établie par Millward apparaît davantage pertinente, au moins pour les protéines pauvres en Lysine comme c'est le cas pour certaines céréales et fruits à coque (Millward, 2012bis). En se référant à cette protéine idéale de Millward, amandes, noix de Grenoble, maïs, triticale, seigle, blé, millet obtiennent des IC sensiblement réévalués avec des valeurs comprises entre 0,83 et 1,22. Selon la céréale

ou le fruit à coque considéré, la teneur protéique est très variable puisqu'elle s'échelonne entre 20-23 % (amandes, pistaches, germe de blé) et 3-5 % (riz, quinoa, millet), en passant par des valeurs intermédiaires comprises entre 10 et 18 % pour les noisettes, noix de cajou ou de Grenoble et des céréales couramment consommées comme le blé, le seigle ou l'avoine.

Les protéines des légumes de type « feuilles » et « fleurs » sont très souvent d'excellente qualité et pourront constituer une part non négligeable de l'apport protéique. Les autres légumes sont moins intéressants, car leurs protéines sont souvent déficientes en Leucine ou en AA soufrés ($0,72 < IC < 0,94$) et/ou leur teneur en protéines peut être très faible (0,9 % pour la carotte).

Les fruits, quant à eux, sont des sources protéiques peu intéressantes. Leur contribution sera, d'une part, quantitativement négligeable (compte tenu du niveau de consommation recommandé : 2-3 portions de fruits par jour apporteront moins de 3-4g de protéines¹⁰) et, d'autre part, la qualité se révèle souvent mauvaise (fraises, myrtilles, orange, etc.) voire très mauvaise ($0,30 < IC \text{ des abricots} < 0,36$).

Les indices chimiques ($IC=AAS$) mesurés pour les protéines végétales révèlent donc une image bien éloignée de celle encore couramment véhiculée. Tous les AAI sont présents dans l'ensemble des aliments végétaux et un bon nombre présente un profil protéique parfaitement complet c'est-à-dire avec des proportions en AAI totalement adaptées aux besoins humains ($IC > 1$). En effet, on constate l'absence d'AAI limitant dans le cas de nombreuses légumineuses (soja, pois chiche, haricots verts et blancs, pois, etc.), pour certaines céréales (sarrasin, quinoa) et certains fruits à coque (pistaches, noix de cajou, etc.).

Cependant, pour certaines céréales comme le maïs ou le blé, on constate un déficit plus ou moins marqué en lysine. Comme ce manque excède rarement 10 à 20 % (en fonction du profil idéal considéré) il est, concrètement, peu problématique. En effet, dans les pays occidentaux, il est aisé d'augmenter de 10 à 20 % la quantité protéique journalière consommée au-delà des recommandations afin de compenser un profil protéique légèrement déséquilibré. Évoquer ce profil imparfait (très relatif) n'est donc pertinent que dans un contexte de forte restriction protéique. Dans ce cas, associer en proportion équivalente céréales et légumineuses¹¹ permet en effet de corriger à la fois le manque de lysine de certaines céréales et le léger déficit en AA soufrés de certaines préparations à base de légumineuses comme le tempeh ou le tofu ([tableau 4](#)).

¹⁰ Calcul de la quantité de protéine par portion de fruit : 1 portion de pomme= 130 g de pomme = **0,4 g de protéine** ; 1 portion de fraise= 150 g de fraise = **1,05 g de protéine** ; 1 portion d'abricot= 120 g d'abricot = **1,7 g de protéine** ; 1 portion de banane= 120 g de banane = **1,3 g de protéine**

¹¹ Cette proportion sera variable en fonction des teneurs protéiques des céréales et légumineuses considérées, voir tableau 3

Parallèlement à l'IC, nous avons également évalué la densité protéique des aliments, car ce paramètre est également important pour appréhender leur qualité. Elle est exprimée ainsi : masse protéique (en g) contenue dans une quantité d'aliments apportant 100 Calories (Cal ou kcal : kilocalories). En effet, pour qu'un aliment puisse être considéré comme une bonne source protéique, son IC et sa densité protéique devront être tous deux de qualité suffisante. Si l'IC est un paramètre permettant de classer d'un côté les aliments au profil protéique idéal (IC=1 ou >1) et de l'autre ceux disposant d'un profil protéique plus ou moins déséquilibré (avec un ou plusieurs AAI en proportion insuffisante, se traduisant par IC<1), les valeurs de densité protéique seront utilisées, quant à elles, avec davantage de nuance. Ainsi, cinq groupes de « Densité protéique » ont été construits afin de faciliter l'emploi de cet outil.

La catégorie « 2,5-5 g protéines / 100 Calories » regroupe les aliments pouvant être considérés de «densité moyenne» c'est-à-dire que leur consommation exclusive conduit à une teneur protéique comprise entre 10-20 % de l'apport énergétique total : la limite inférieure est atteinte pour un aliment de densité protéique de 2,5 g / 100 Cal et la limite haute est atteinte pour un aliment de densité protéique de 5 g / 100 Cal, conformément aux recommandations de l'Anses pour l'adulte¹² pour un apport énergétique total (AET) moyen de 2000 Cal. Ces aliments de densité protéique moyenne sont rencontrés au sein du groupe des céréales et des fruits à coque. Encadrant cette catégorie centrale, nous avons défini deux catégories au-dessus (5-10g et > 10g protéine / 100 Cal) et deux catégories en dessous (2-2,5g et < 2g protéine / 100 Cal).

De fortes ou très fortes densités protéiques (> 5 g protéine / 100 Cal) sont rencontrées pour un nombre limité d'aliments. Il s'agit des aliments d'origine animale, des légumineuses, de certains légumes (feuilles et fleurs), du champignon de Paris et, de façon plus anecdotique, du germe et du son de blé. Les plus faibles densités (< 2,5 g protéine / 100 Cal) sont observées pour la majorité des fruits sucrés, certains légumes (racines, tubercules et fruits non sucrés), certains fruits à coque (noisettes, noix de Grenoble, etc.) et certaines céréales (riz, maïs, etc.).

Afin de couvrir les besoins protéiques sans recourir à des apports énergétiques excessifs, la consommation d'aliments à densité protéique faible à nulle (boissons sucrées et huiles) devra nécessairement être compensée par la consommation d'aliments à plus forte densité. En conséquence, sauf à se passer totalement des produits à faible densité protéique, il apparaît nécessaire de recourir à des aliments de fortes ou très fortes densités protéiques (> 5 g protéine / 100 Cal).

Une alimentation omnivore répond à ce problème en intégrant une quantité significative de produits animaux et, de façon très marginale, des légumes (de type « feuilles » et « fleurs »),

¹² Dans le cas de cette catégorie protéique appelée « densité moyenne », voir la partie portant sur « La quantité de protéines végétales dont le corps humain a besoin » pour la justification de la limite inférieure (10 % protéine soit 2,5 g protéine/100 Calories) et de la limite supérieure (20 % protéine soit 5 g protéine/100 Calories).

comme le montrent les enquêtes de consommation alimentaire de l'Anses (INCA-3). En effet, selon cette étude, les 90 g de protéines consommées en moyenne quotidiennement par un Français adulte se répartissent de la façon suivante :

- 54 g (60 %) proviennent des produits animaux (viandes, poissons, œufs et produits laitiers) ;
- 17g (19 %) des céréales ;
- 5,5 g (6 %) des fruits et légumes (hors pomme de terre) ;
- 13,5 g (15 %) apportés par d'autres types d'aliments (pomme de terre, légumineuses, etc.).

Afin de diminuer la part des protéines animales au profit de leurs versions végétales, deux possibilités non exclusives s'offrent à nous à travers la consommation de légumineuses et de légumes de type « feuilles » et « fleurs ». En effet, la majorité de ces aliments présente, comme les produits animaux, à la fois une densité protéique forte (> 5 g protéine / 100 Cal) et un IC proche ou supérieur à 1. S'appuyer seulement sur les légumes apparaît difficilement envisageable en raison de la quantité très élevée d'aliments que cela représente si une personne choisit d'éliminer totalement les protéines animales de son alimentation. En effet, si on envisage un apport protéique de 15 % de l'AET (soit 75 g de protéine pour 2000 Cal), il convient de remplacer les protéines animales apportées dans le cadre du régime alimentaire français par autant de protéines végétales de qualité équivalente. Si on se réfère à l'enquête INCA3, les protéines végétales contribuent à hauteur de 36 g ($17+5,5+13,5 = 36$ g). De ce fait, pour une consommation totale cible de 75 g de protéines (15 % de l'AET), les produits d'origine animale devraient contribuer à hauteur de 39 g ($75-36 = 39$ g). Ainsi, en première approximation, cela reviendrait à augmenter la consommation moyenne quotidienne de légumes « feuilles » et « fleurs » (+ 1800 g) ou de légumineuses (+ 415 g) ou bien encore d'une combinaison de ces deux catégories alimentaires ; par exemple avec 300 g de légumineuses (28 g de protéine) et 500 g de légumes « feuilles » et « fleurs » (11 g de protéine). Sachant que la consommation quotidienne moyenne de la population française adulte (réf. INCA3) est de 140 g pour les légumes et de 8-10 g pour les légumineuses (soit une quantité presque négligeable), cela permet de justifier notre recommandation de 3-4 portions de légumineuses ($\approx 300-400$ g) et d'au moins 5-6 portions de légumes (>500-600g en privilégiant les légumes « feuilles » et « fleurs »).

3.2.4. Comment substituer les protéines animales par des protéines végétales ?

Afin de pouvoir discuter plus en détail des particularités des différentes sources protéiques alimentaires, nous avons établi les profils protéiques complets d'un échantillon alimentaire représentatif dans le tableau 5.

Tableau 5 : calcul des IAAS de quelques aliments

Pour un aliment donné, le score IAAS de chaque AAI est calculé en divisant sa quantité effective dans l'aliment par sa quantité théorique au sein de la protéine de référence. Pour ce faire deux protéines de référence différentes sont utilisées :

- La protéine de référence proposée par le comité OMS en 2007 : **les scores IAAS ainsi calculés sont indiqués en gras** ;
- La protéine de référence proposée par Millward en 2012 : *les scores IAAS ainsi calculés sont indiqués en italique.*

Pour chaque aliment, le(s) plus petit(s) IAAS est(sont) noté(s) sur fond **jaune**

Pour chaque aliment, le(s) plus grand(s) IAAS est(sont) noté(s) sur fond **bleu**

Les IAAS avec un score < 1 (facteur(s) limitant(s) de la protéine) sont écrits **en rouge**.

% AAI = masse des AAI rapportée à la masse de l'ensemble des AA (AANI + AAI) de la protéine étudiée.

^a Pour les bananes crues, aucune donnée pour les AAI soufrés → utilisation des données issues des bananes déshydratées.

^b Pour les choux de Bruxelles, aucune donnée pour la tyrosine (AAI aromatiques) → extrapolation à partir des données provenant des autres choux (tyrosine représente ≈40 % des AAI aromatiques).

Aliment		IAAS calculés à partir de 2 protéines de référence :								% AAI	
		<i>OMS 2007 - Millward 2012</i>									
		<i>His</i>	<i>Iso</i>	<i>Leu</i>	<i>Lys</i>	<i>Souf</i>	<i>Arom</i>	<i>Thr</i>	<i>Trp</i>	<i>Val</i>	28 - 17
Légumineuses	Pois chiche (bouillis)	1,83 - 2,29	1,43 - 1,95	1,21 - 2,30	1,49 - 2,91	1,20 - 1,39	2,06 - 3,27	1,62 - 1,96	1,60 - 1,92	1,08 - 2,47	40
	Haricots blancs (bouillis)	1,85 - 2,32	1,47 - 2,00	1,35 - 2,58	1,53 - 2,99	1,18 - 1,37	2,16 - 3,42	1,83 - 2,22	1,97 - 2,36	1,34 - 3,08	43
	Haricots verts (bouillis)	1,23 - 1,54	1,22 - 1,66	1,04 - 1,98	1,07 - 2,09	0,99 - 1,14	1,57 - 2,49	1,89 - 2,28	1,77 - 2,12	1,26 - 2,89	35
	Lentilles vertes (graines bouillies)	1,88 - 2,35	1,44 - 1,96	1,29 - 2,34	1,55 - 3,03	0,98 - 1,14	2,00 - 3,17	1,56 - 1,88	1,50 - 1,80	1,27 - 2,92	41
	Tofu (précipitation au nigari)	1,82 - 2,27	1,79 - 2,45	1,49 - 2,85	1,24 - 2,43	0,77 - 0,89	2,56 - 4,05	2,16 - 2,62	2,47 - 2,96	1,41 - 3,24	46
Céréales (et	Quinoa (bouilli)	1,87 - 2,33	1,15 - 1,57	0,97 - 1,85	1,17 - 2,29	1,60 - 1,85	1,55 - 2,46	1,25 - 1,52	1,90 - 2,28	1,04 - 2,39	34
	Maïs (grains entiers cuits)	1,78 - 2,22	1,30 - 1,77	1,78 - 3,39	0,92 - 1,80	1,28 - 1,48	2,17 - 3,43	1,70 - 2,05	1,12 - 1,35	1,44 - 3,29	42
	Riz Blanc (bouilli)	1,57 - 1,96	1,44 - 1,97	1,40 - 2,66	0,80 - 1,57	2,00 - 2,32	2,29 - 3,62	1,55 - 1,88	1,95 - 2,34	1,56 - 3,58	47
	Blé (farines à pain)	1,41 - 1,77	1,24 - 1,69	1,17 - 2,23	0,43 - 0,84	1,76 - 2,04	2,02 - 3,19	1,16 - 1,41	1,93 - 2,32	1,07 - 2,46	34

Fruits à coque	<i>Pistaches (crués)</i>	1,69 - 2,12	1,52 - 2,07	1,35 - 2,57	1,26 - 2,46	1,47 - 1,70	2,09 - 3,31	1,47 - 1,78	2,08 - 2,50	1,59 - 3,64	43
	<i>Noix de cajou (crués)</i>	1,67 - 2,08	1,43 - 1,95	1,37 - 2,61	1,13 - 2,22	1,86 - 2,16	2,11 - 3,33	1,65 - 2,00	2,67 - 3,20	1,54 - 3,53	43
	<i>Noix de Grenoble (crués)</i>	1,71 - 2,13	1,37 - 1,86	1,30 - 2,48	0,62 - 1,21	1,32 - 1,53	1,93 - 3,05	1,70 - 2,06	1,87 - 2,24	1,27 - 2,91	37
	<i>Amandes (crués)</i>	1,70 - 2,12	1,18 - 1,61	1,18 - 2,25	0,60 - 1,17	0,80 - 0,93	1,97 - 3,12	1,23 - 1,49	1,67 - 2,00	1,04 - 2,38	33
Légumes (et assimilés)	<i>Epinards (bouillis)</i>	1,48 - 1,85	1,71 - 2,33	1,32 - 2,51	1,36 - 2,67	1,38 - 1,59	2,18 - 3,46	1,86 - 2,25	2,25 - 2,70	1,45 - 3,32	44
	<i>Spiruline (algue sèche ou fraîche)</i>	1,26 - 1,57	1,86 - 2,54	1,46 - 2,77	1,17 - 2,29	1,43 - 1,65	2,45 - 3,89	2,25 - 2,72	2,70 - 3,24	1,57 - 3,60	47
	<i>Choux verts « kale » (cuits)</i>	1,41 - 1,76	2,00 - 2,73	1,19 - 2,26	1,33 - 2,61	1,03 - 1,19	2,27 - 3,60	1,94 - 2,35	2,02 - 2,42	1,40 - 3,22	43
	<i>Algues Emi-Tsunomata de culture</i>	1,00 - 1,25	1,22 - 1,66	1,00 - 1,91	1,09 - 2,13	1,51 - 1,75	1,06 - 1,67	1,66 - 2,01	1,80 - 2,16	1,12 - 2,56	33
	<i>Chou-fleur (cuit)</i>	1,34 - 1,67	1,27 - 1,73	0,99 - 1,88	1,20 - 2,34	1,16 - 1,35	1,52 - 2,40	1,58 - 1,92	2,17 - 2,60	1,28 - 2,94	35
	<i>Salade verte (laitue crue)</i>	1,08 - 1,35	2,06 - 2,81	0,98 - 1,87	1,37 - 2,69	1,07 - 1,24	1,68 - 2,67	1,89 - 2,28	1,10 - 1,32	1,32 - 3,03	39
	<i>Oignons (bouillis)</i>	1,08 - 1,35	1,18 - 1,60	0,60 - 1,14	1,06 - 2,08	1,17 - 1,35	1,34 - 2,11	1,05 - 1,28	2,45 - 2,94	0,58 - 1,34	27
	<i>Choux de Bruxelles (cuits)</i>	1,49 - 1,87	1,31 - 1,78	0,76 - 1,44	1,01 - 1,98	0,71 - 0,83	1,22 - 1,93	1,55 - 1,88	1,83 - 2,20	1,18 - 2,70	31
	<i>Carottes (crués)</i>	2,86 - 3,57	2,77 - 3,78	1,87 - 3,55	2,41 - 4,71	3,10 - 3,58	2,94 - 4,66	8,91 - 10,79	2,10 - 2,52	1,89 - 4,35	82
	<i>Pommes de terre sans peau (bouillies)</i>	1,46 - 1,82	1,35 - 1,84	1,01 - 1,92	1,36 - 2,65	1,31 - 1,52	2,15 - 3,40	1,58 - 1,91	2,63 - 3,16	1,44 - 3,31	40
	<i>Poivrons (crués)</i>	1,13 - 1,42	0,70 - 0,95	0,61 - 1,16	0,80 - 1,57	1,14 - 1,32	1,55 - 2,46	1,74 - 2,11	2,00 - 2,40	0,79 - 1,82	28
	Fruits	<i>Airelles (crués)</i>	2,61 - 3,26	2,39 - 3,26	1,96 - 3,72	1,88 - 3,69	0,59 - 0,68	3,89 - 6,16	2,65 - 3,21	1,08 - 1,30	2,51 - 5,75
<i>Bananes (crue)</i>		4,71 - 5,88	0,86 - 1,17	1,06 - 2,01	1,02 - 2,00	1,60 - 1,85	1,40 - 2,21	1,12 - 1,35	1,37 - 1,64	1,11 - 2,55	37
<i>Oranges (crue)</i>		1,27 - 1,59	0,89 - 1,21	0,42 - 0,79	1,11 - 2,17	1,45 - 1,68	1,32 - 2,08	0,70 - 0,84	1,60 - 1,92	1,09 - 2,51	27
<i>Abricots (cru)</i>		1,29 - 1,62	0,98 - 1,34	0,93 - 1,77	1,54 - 3,00	0,30 - 0,34	1,53 - 2,42	1,46 - 1,77	1,47 - 1,76	0,86 - 1,98	31
Champig	<i>Ch. de Paris (cru)</i>	1,84 - 2,3	1,31 - 1,78	1,05 - 2,00	1,29 - 2,52	0,85 - 0,99	1,12 - 1,77	2,09 - 2,53	2,77 - 3,32	0,92 - 2,11	35
	<i>Ch. de Paris (grillé)</i>	1,32 - 1,66	0,92 - 1,25	0,77 - 1,47	0,74 - 1,46	0,75 - 0,87	1,37 - 2,16	1,65 - 2,00	2,27 - 2,72	3,20 - 7,35	37
D'origine animale	<i>Lait entier de vache</i>	2,01 - 2,52	1,72 - 2,35	1,61 - 3,06	1,86 - 3,64	1,47 - 1,71	2,69 - 4,26	1,85 - 2,24	2,12 - 2,54	1,68 - 3,85	52
	<i>Œuf poule entier et cuit (dur)</i>	1,58 - 1,98	1,82 - 2,48	1,45 - 2,76	1,60 - 3,13	2,47 - 2,86	2,47 - 3,91	2,09 - 2,53	2,03 - 2,44	1,56 - 3,59	51
	<i>Poissons blancs (mélange cuit)</i>	1,97 - 2,46	1,54 - 2,10	1,38 - 2,62	2,04 - 4,00	1,83 - 2,12	1,92 - 3,03	1,90 - 2,31	1,87 - 2,24	1,32 - 3,03	47
	<i>Poulet (viande rôtie / sans la peau)</i>	2,07 - 2,58	1,76 - 2,40	1,27 - 2,42	1,89 - 3,70	1,84 - 2,13	1,93 - 3,06	1,83 - 2,22	1,95 - 2,34	1,27 - 2,92	46
	<i>Bœuf 20% MG (viande cuite)</i>	2,17 - 2,71	1,47 - 2,01	1,32 - 2,52	1,84 - 3,60	1,60 - 1,85	1,83 - 2,89	1,68 - 2,04	0,85 - 1,02	1,26 - 2,89	43

Nous avons établi dans la partie précédente (« calcul de l'IC ») que le fait de présenter un ou plusieurs AAIS excédentaires (AAIS >1) n'apporte aucun avantage si la source protéique est consommée de façon isolée. Dans les faits, comme plusieurs aliments sont consommés à l'échelle d'une journée, les protéines caractérisées par un ou plusieurs AAIS excédentaires (pour tel ou tel AAI) peuvent être en mesure de compenser des profils déficitaires pour ces mêmes AAI. C'est sur ce point que la supposée supériorité des protéines animales est souvent mise en avant. Cependant, pour être rigoureuse, cette proposition devrait intégrer l'aspect quantitatif des déficits à compenser.

L'analyse du profil protéique des différentes catégories alimentaires ([tableau 4](#)) montre l'excellente qualité des produits d'origine animale avec de nombreux AAI présents en excès. Par contraste, on remarque effectivement l'existence d'AAI limitant dans le cas de nombreux aliments d'origine végétale ou fongique. Dans le cas des légumineuses, comme nous avons eu l'occasion de le spécifier précédemment, l'ensemble des AAI seront apportés en quantité optimale (y compris les AA soufrés) si on prend garde de varier suffisamment les aliments consommés. En revanche, ce ne sera pas forcément le cas pour les céréales, les fruits à coque, les légumes ou les fruits puisqu'un ou plusieurs AAI apparaissent souvent déficitaires. Comme les catégories « céréales » et « légumineuses » représentent à elles seules souvent plus de 75 % des apports protéiques d'une alimentation végétale, il convient d'accorder une attention particulière aux céréales. Sauf exception (quinoa, sarrasin), les céréales n'apportent pas suffisamment de Lysine ([tableau 4](#)). Dans la suite, il conviendra donc d'établir si la consommation des autres sources protéiques d'origine végétale permet de compenser ce déficit en lysine, tout comme le font par ailleurs les protéines animales dans le cadre d'un régime incluant des quantités suffisantes de produits d'origine animale.

Une dernière caractéristique est quelquefois mise en avant pour justifier la supériorité des protéines d'origine animale sur celles provenant des végétaux : la digestibilité.

3.3. Estimation de la qualité protéique en intégrant IC et digestibilité

La qualité d'une protéine dépend à la fois :

- De sa digestibilité : qui est utilisée ici comme approximation de la biodisponibilité ; sachant que, pour cette dernière, aucun protocole d'évaluation directe n'est actuellement disponible
- Et de l'adéquation de son profil en acides aminés avec celui d'une protéine idéale : caractéristique pouvant être appréciée par le calcul de l'Indice Chimique : IC (AAS en anglais).

La méthode PDCAAS est une méthode mise en place en 1991 (OMS, 1991) qui se propose d'évaluer la qualité d'une protéine en multipliant son IC (ou Amino Acid Score : AAS) par une mesure de sa digestibilité :

$$\text{PDCAAS} = \text{AAS (IC)} \times \text{Digestibilité}$$

Cette formule simple indique que les composantes « digestibilité » et « IC » peuvent mutuellement se compenser. Mais attention, le champ d'application de cette multiplication se restreint aux valeurs d'IC ≤ 1 . Ainsi, une mauvaise digestibilité (<100 %) ne saurait en aucun cas être contrebalancée par un IC « supérieur à 1 ». Par exemple, pour une protéine ayant un IC (AAS) de « 1,19 » et une digestibilité de « 0,84 », son PDCAAS n'est en fait pas égal à « 1 ».

En effet, la qualité d'une telle protéine (ayant un IC >1) est directement limitée par sa digestibilité et sera donc uniquement le reflet de cette même digestibilité. Plus précisément, cela s'explique par le fait qu'un IC « supérieur à 1 » ne caractérise pas une protéine de meilleure qualité qu'un IC « égal à 1 », car les AAI excédentaires seront théoriquement convertis en AANI de manière à compenser leur manque relatif dans un tel profil. Ce constat conduit à tronquer à la valeur « 1 » les IC (=AAS) dépassant « 1 » (100 %). Si on reprend l'exemple précédent, le PDCAAS de cette protéine est en fait de « 0,84 », soit la valeur de sa digestibilité (PDCAAS = 1 (AAS tronqué) x 0,84 (digestibilité) = 0,84).

Une autre façon d'aborder cette même idée est de considérer le cas d'une digestibilité de 100 % (valeur de 1). Ici, la valeur du PDCAAS correspondra donc à celle de l'IC, mais les PDCAAS obtenant des valeurs « supérieures à 1 » devront logiquement être tronquées à « 1 ». En effet, la qualité d'une protéine ne peut théoriquement excéder la valeur de « 1 », s'appliquant par définition à une protéine contenant chacun des différents AAI en proportion idéale¹³. De ce fait, cela revient, comme dans l'exemple précédent, à tronquer à la valeur de « 1 » les IC ≥ 1 .

Cependant, toutes ces remarques ne se justifient que dans le cas, peu réaliste, d'une consommation protéique isolée. Ce qui nous conduit tout droit au premier problème soulevé par cette méthode : **une protéine n'est presque jamais consommée isolément** (au cours d'un même repas ou d'une même journée). Comparée à une protéine présentant un profil en AA idéal (IC=1), c'est-à-dire ayant une composition en AAI exactement identique à celle de la protéine de référence, une protéine ayant des AAI surreprésentés (IC ≥ 1) doit être considérée comme plus intéressante dans la mesure où elle contribue potentiellement à compenser les profils déficitaires en un ou plusieurs AAI (IC<1) des autres protéines consommées. Cette possibilité n'est pas prise en compte avec cette méthode PDCAAS sauf dans le cas plutôt rare où le calcul est réalisé à partir de données obtenues spécifiquement

¹³ Comme ceci a déjà été précisé précédemment, les protéines avec un IC supérieur à 1 ne peuvent être considérées comme ayant un profil idéal en AA (IC=1) que dans la mesure où l'on suppose que le ou les AAI surreprésentés sont totalement convertis en AANI.

pour l'association alimentaire en question (c'est-à-dire en utilisant la digestibilité globale du repas et le profil global en AA de ce même repas).

Bon nombre d'autres critiques ont été adressées à l'encontre de cette méthode. Par exemple, la comparaison des valeurs obtenues par cette méthode PDCAAS avec des mesures *in vivo*¹⁴, montre une forte surestimation de la qualité protéique pour certains aliments particulièrement riches en facteurs antinutritionnels (Gilani, 2012).

Dans ces cas précis, il semblerait donc que la mesure de la digestibilité protéique ne constitue pas une approximation fidèle de la biodisponibilité protéique. Cependant, il convient de limiter la portée de cette critique dans la mesure où elle ne concerne en fait qu'un nombre très limité d'aliments : lait de vache surcuit, farine de moutarde, graines de soja crues, haricots noirs crus, extraits de protéines de soja obtenues par traitement alcalin à haute température, etc. Il s'agit donc soit d'aliments peu courants comme la farine de moutarde, soit de légumineuses consommées crues (alors qu'elles sont toujours consommées cuites chez l'humain) ou bien encore d'aliments ayant subi des traitements physico-chimiques bien particuliers pour leur fabrication ou lors de leur cuisson (réactions de Maillard, traitement alcalin à haute température, etc.). Nous reviendrons par la suite plus en détail sur le cas particulier des AAI (notamment la lysine) engagés dans les réactions de Maillard, expliquant probablement la forte baisse de la biodisponibilité des aliments cuisinés de la sorte (Boye et al, 2012 ; Rutherfurd, 2015 ; Sarwar et al. 2012). Cette discordance entre biodisponibilité et digestibilité protéique s'explique ici notamment par l'idée plus générale voulant que la digestibilité d'un AAI en particulier puisse fortement varier par rapport à celle mesurée à l'échelle de la protéine entière. Cette remarque constitue une autre limite importante à l'approche PDCAAS puisque cette dernière **ne prend pas en compte les variations de digestibilité pour chacun des AAI au sein d'une protéine**. En conséquence, une bonne digestibilité protéique globale peut en fait cacher une très faible digestibilité d'un ou plusieurs AAI en particulier, qu'elle soit due au mode de cuisson ou aux influences exercées par les différentes molécules environnantes (comme les facteurs antinutritionnels de la matrice alimentaire). Cette dernière critique a conduit à la mise en place d'une nouvelle méthodologie proche de celle du PDCAAS et appelée DIAAS (Digestible Indispensable Amino Acid Score) qui considère cette fois-ci la digestibilité individuelle de chaque AAI et non plus la digestibilité protéique globale (Rutherfurd, 2015). Alors que la méthode PDCAAS multiplie l'IC (AAS) par la digestibilité protéique de manière à corriger cet IC par la digestibilité de la protéine entière, la méthode DIAAS tient directement compte de la digestibilité avant d'opérer à la comparaison avec le profil en AA idéal de la protéine de référence. Plus précisément, le calcul permettant de déterminer le DIAAS est le suivant : pour chaque AAI, sera calculé le rapport entre, d'une part, la quantité -effectivement absorbée lors de la

¹⁴ Ces comparaisons ont été réalisées chez le rat. Il s'agit de calculs de PDCAAS de rat (utilisant une protéine idéale de rat pour les calculs) qui ont été comparés à d'autres méthodes d'évaluation de la qualité protéique réalisées *in vivo* (chez le rat).

digestion- de l'AAI au sein de la protéine d'intérêt et, d'autre part, la quantité de ce même AAI au sein de la protéine de référence. Parmi les différents rapports ainsi calculés, celui qui obtiendra la plus faible valeur déterminera le DIAAS d'une protéine.

De plus, l'approche DIAAS diffère également de la PDCAAS, car cette dernière est basée sur des valeurs de digestibilité enregistrées au niveau fécal alors que la première considère des données mesurées au niveau iléal.

3.4.1. Les différentes mesures de digestibilité

De nombreuses méthodes permettent d'accéder à différentes estimations de la digestibilité à l'échelle de la protéine ou d'un AAI en particulier.

Historiquement, la digestibilité des protéines végétales (de céréales et légumineuses) était largement minorée, car elle était souvent évaluée sur des protéines crues (Mariotti, 2017, p624), or il a été montré que leur digestibilité était fortement augmentée quand les protéines étaient suffisamment chauffées. En effet, la cuisson des céréales et légumineuses entraîne la dénaturation de leurs protéines, ce qui facilite l'accès aux enzymes digestives, et provoque la destruction de certains facteurs antinutritionnels comme les inhibiteurs de protéases (Boye et al, 2012). Cet effet favorable des fortes températures n'est pas observé avec la viande. Dans ce cas, la chaleur agirait uniquement sur la cinétique d'absorption protéique, plus rapide si la température est inférieure à 75°C, mais n'affecterait pas le niveau global de digestibilité (Santé-Lhoutellier, 2017).

De plus, les mesures de digestibilité sont généralement réalisées chez le rat ce qui peut amener à sous-estimer la digestibilité de certains végétaux. La digestibilité peut être définie comme la proportion des AA consommés (le plus souvent sous forme de protéines) qui seront effectivement digérés puis absorbés au niveau intestinal. La quantification des apports et des pertes azotées permet d'évaluer la digestibilité en appliquant la formule suivante :

$$\text{Digestibilité protéique} = \frac{\text{Apports azotés alimentaires} - \text{Pertes azotées digestives}}{\text{Apports azotés alimentaires}}$$

Au niveau des pertes digestives, le plus facile consiste à mesurer les pertes au niveau des selles (appelées également fèces). On parle dans ce cas de digestibilité protéique fécale.

3.4.2. Digestibilité protéique fécale

L'azote quantifié au niveau fécal est de triple origine : alimentaire, endogène (desquamations et sécrétions azotées intestinales) et le résultat de l'activité du microbiote intestinal. Ce constat rend l'utilisation des valeurs brutes difficile à manipuler, conduisant d'une part à la mise en place de corrections (digestibilité fécale vraie) et, d'autre part, à l'abandon de ces mesures fécales au profit de mesures directement réalisées au niveau iléal.

Dans un premier temps, la seule correction qui a été entreprise consistait à soustraire les pertes endogènes (pouvant être estimées à un niveau basal indépendamment de l'alimentation), car elles augmentent les pertes mesurées au niveau fécal et donc diminuent artificiellement les valeurs réelles de digestibilité. Après cette correction, la digestibilité est qualifiée de « vraie ». Quant à la prise en compte de l'activité du microbiote, deux cas de figure doivent être considérés. En fonction de la nature du microbiote et de l'AA considéré, soit le microbiote produit des AA, soit il en utilise. Ce dernier cas semble largement majoritaire (Darragh, 2000). Cette consommation devrait donc être ajoutée, car elle diminue les pertes mesurées au niveau fécal, ce qui augmente artificiellement les valeurs réelles de digestibilité. Comme l'activité métabolique microbienne ne peut être précisément prise en compte pour corriger les valeurs obtenues au niveau fécal et comme cette activité semble principalement localisée dans le gros intestin¹⁵, la mesure de la digestibilité au niveau iléal sera préférée (Darragh, 2000).

Les digestibilités fécales vraies demeurent cependant les données les plus nombreuses aujourd'hui. Elles restent donc encore largement utilisées pour comparer la digestibilité de différents aliments entre eux ainsi que pour calculer les PDCAAS (Tableau 6).

Alors que la digestibilité fécale vraie des produits animaux est élevée et comprise dans d'étroites limites autour de 95 %, celle des produits végétaux est en moyenne plus faible et varie considérablement en fonction de l'aliment. Les digestibilités les plus faibles sont obtenues pour les céréales ultra-transformées (typiquement, les céréales du petit déjeuner) avec des valeurs comprises entre 70 et 80 %. Ces faibles digestibilités sont imputables au mode de fabrication à haute température qui implique des réactions de Maillard, générant une baisse importante de la digestibilité de certains AA comme la Lysine (Sarwar et al, 2012). Les digestibilités les plus fortes atteignent 90 à 99 % et sont observées pour les graines oléagineuses (cacahuète et tournesol) ainsi que pour les céréales et légumineuses raffinées (comme le seitan, la farine blanche de blé et les extraits de protéines de soja). L'augmentation de la digestibilité de ces céréales et légumineuses raffinées s'expliquerait par l'éviction de facteurs antinutritionnels comme les tanins ou les acides phytiques (Sarwar

¹⁵ Même si une faible activité du microbiote dans l'intestin grêle a été mesurée, elle apparaît comme très minoritaire par rapport à celle observée au niveau du gros intestin.

et al, 2012). Quant aux céréales et légumineuses complètes, elles obtiennent des valeurs intermédiaires entre 80 et 90 %.

Dans les deux prochaines parties, nous présenterons les mesures de digestibilité iléale qui, quoique plus difficiles à mettre en œuvre, sont reconnues pour être bien plus fiables que les données obtenues au niveau fécal (FAO subcommittee report, 2011).

Tableau 6 : Digestibilités fécales vraies (OMS 1985 ; OMS 2007)

Aliments		Digestibilité fécale vraie (%)
Œufs / Lait / Fromage / Viandes / Poissons		95 ± 3
Céréales et légumineuses raffinées	Gluten	99
	Farine blanche de blé	96
	Extraits de protéine de soja	95
Graines oléagineuses	Cacahuète / Beurre de cacahuète	94-95
	Farine de graines de tournesol	90
Céréales et légumineuses complètes	Pois	88
	Maïs	86
	Flocons d'avoine	86
	Farine de soja	86
	Blé complet	86
	Millet	79
	Haricots secs	78
Céréales ultra-transformées pour le petit déjeuner	Blé	77
	Avoine	72
	Maïs	70

3.4.3. Digestibilités protéiques iléales

Comme pour la digestibilité fécale, la digestibilité iléale apparente (mesurée) doit être corrigée par la prise en compte des pertes endogènes. Deux corrections sont appliquées :

- Soit on soustrait les pertes endogènes dont la quantité est estimée à un niveau basal indépendamment de l'alimentation (appelée digestibilité iléale « vraie ») ;
- Soit on soustrait les pertes endogènes réellement mesurées dans le cas précis de l'alimentation étudiée (appelée digestibilité iléale « réelle »).

Cette dernière correction est préférable, car les pertes endogènes varient fortement en fonction de l'alimentation, même si les données sont encore très peu nombreuses, car difficiles à obtenir chez l'humain. La digestibilité iléale peut être évaluée soit à l'échelle de la protéine entière soit au niveau de chacun des AA constituant une protéine (valeurs utilisées dans la méthode DIAAS). Ainsi, pour une protéine donnée, l'évaluation de sa

digestibilité peut se faire indirectement en calculant une moyenne à partir des valeurs obtenues pour chacun des AA constituant la protéine (cette moyenne est pondérée en tenant compte de la proportion de chacun des AA dans la protéine étudiée). Comme les mesures directes de digestibilités iléales vraies sur l'humain sont rares, des valeurs ont pu être extrapolées à partir de celles obtenues chez le cochon qui est considéré comme le meilleur modèle pour notre espèce (FAO subcommittee report, 2011). Ces données peuvent être intéressantes, notamment en l'absence de mesure directe (Tableau 7).

Chez le rat, les digestibilités iléales vraies les plus faibles (autour de 70 %) sont mesurées pour certaines céréales comme le riz et les céréales ultra-transformées du petit déjeuner (corn flakes). Chez l'humain, nous manquons de données directes pour les céréales, à l'exception de mesures pour les aliments à base de blé (85-90 %) (Tomé et al, 2013 ; Bos et al, 2005). Les données indirectes (extrapolées à partir de celles provenant du cochon) attribuent pour l'ensemble des céréales des valeurs comprises entre 75 et 90 %. Pour les légumineuses, nous disposons de plusieurs données directes concordantes mesurant des digestibilités comprises entre 89,5 et 98 % (Gaudichon et al., 2002 ; Mariotti et al, 2001 et 2002 ; Gausserès et al., 1996 et 1997 ; Tomé et al, 2013). Ainsi, si on se concentre sur les données directement obtenues chez l'humain, les digestibilités iléales mesurées pour les végétaux sont, sauf rares exceptions¹⁶, très proches des 90 %, ce qui est comparable aux valeurs obtenues pour les produits animaux (90-95 %).

Ainsi, comme le précise Mariotti, « À la différence des données obtenues historiquement chez le rat ou le cochon, les mesures directes de digestibilité chez l'humain montrent peu de différence entre les protéines animales et végétales [...] » (Mariotti, 2017).

Tableau 7 : digestibilités iléales chez le rat (directement mesurées) et l'humain (extrapolées à partir du cochon et directement mesurées)

a FAO subcommittee report 2011, Rutherford et al., 2015

b Digestibilités iléales humaines extrapolées à partir de mesures réalisées chez le **cochon** (FAO subcommittee report 2011)

c Digestibilités iléales mesurées chez l'**humain** au niveau des protéines entières (FAO subcommittee report 2011, Tomé et al., 2013)

d Digestibilités iléales moyennes calculées à partir de mesures réalisées chez l'**humain** au niveau des différents AA (Gaudichon et al., 2002)

e Bos et al., 2005

f Gausserès et al., 1996; Gausserès et al., 1997

g Bos et al., 2007

h Mariotti et al., 2001; Mariotti et al., 2002

i Oberli et al., 2015

¹⁶ Certaines mesures sur le blé (85 %) et sur le colza (84-87 %) sont nettement en deçà des 90 %.

Aliment		Digestibilités iléales (%)			
		Vraies			Réelles
		Rata (mesures directes)	Humain		
			Extrapoléesb	Directes	
Lait / caséine / protéines de lait		92	89-95	94-96c	95±2d
Œuf cuit (cru)		-	-	91(51)c	-
Poisson		-	90-91	-	-
Viande		-	-	90-94i	-
Légumineuses (cuites)	Protéine de soja	95	-	91,5-98c	94±3d
	Protéine de pois / farine de pois	97	-	89,5-91,5f	90±4d
	Protéine de lupin / farine de lupin	-	-	-	90±4h
	Haricots secs et pois entiers	80-88	58-82	-	-
Céréales (cuites)	Farines de blé / pain / gluten de blé	-	75-95	85-90c	90±4e
	Riz cuit	73	90	-	-
	Triticale	-	84	-	-
	Maïs / farine de maïs	-	81-82	-	-
	Avoine / flocons d'avoine	88-88,5	74-79	-	-
	Seigle	-	75	-	-
	Corn-flakes	67	-	-	-
Colza / protéine de colza		-	90	87c	84g

3.4.4. Apports et limite de la méthode DIAAS

Le développement de la méthode appelée DIAAS nécessite des informations précises sur la digestibilité iléale pour chacun des AAI de chaque aliment testé. Ces données étant très peu nombreuses à l'heure actuelle, la méthode DIAAS n'est encore que très peu utilisée dans les faits. De façon générale, les rares données accessibles au niveau des acides aminés ne contredisent pas celles obtenues par d'autres méthodes au niveau des protéines entières (Rutherford, 2015). Cependant, cette approche n'est pas toujours inutile. Elle permet notamment d'expliquer comment certaines protéines voient leur biodisponibilité baissée lorsqu'elles sont impliquées dans les réactions de Maillard, ce dont la digestibilité protéique globale (protéine entière) ne peut rendre compte directement. C'est ce que montre une étude récente chez le rat où est mesuré un important différentiel entre la digestibilité protéique iléale vraie des corn-flakes (67 %) et la digestibilité iléale de la lysine (13 %) de ces mêmes corn-flakes (tableau 6). Dans ce cas très particulier lié au mode de transformation de cet aliment, l'utilisation de la digestibilité protéique (67 %) se révèle inadaptée, car elle conduit à fortement surestimer la qualité de ce type de céréales du petit déjeuner (Rutherford et al., 2015). Malgré le bon profil protéique du maïs (tableaux 3 et 4), les corn-flakes constituent en fait une très mauvaise source protéique, car fournissant très peu de lysine à l'organisme en raison de la très faible digestibilité de cet AAI dans ce contexte particulier.

La méthode DIAAS présente des limites qui sont accentuées quand elle concerne l'évaluation des protéines d'origine végétale. Parmi celles-ci on retrouve : l'incapacité à traduire les différences de facteurs de conversion azote-protéines entre les aliments d'origine végétale et animale, la représentation limitée des aliments d'origine végétale couramment consommés dans le cadre de notation, la reconnaissance inadéquate de la digestibilité accrue des aliments d'origine végétale traités thermiquement et transformés couramment consommés, sa formulation centrée sur des modèles animaux à croissance rapide plutôt que sur les humains, et l'accent mis sur des aliments isolés individuels par rapport à la matrice alimentaire (Craddock, 2021).

À l'heure actuelle, le nombre restreint de données sur la digestibilité iléale des acides aminés ne permet pas une utilisation généralisée de la méthode DIAAS chez l'humain. De plus, à l'exception des préparations alimentaires générant des réactions de Maillard (où l'utilisation de la digestibilité protéique globale n'est pas pertinente), évaluer la qualité protéique d'un aliment par la méthode DIAAS n'apporte pas d'informations supplémentaires significatives par rapport à l'approche PDCAAS. Elle présente également des limites, notamment dans l'évaluation des protéines végétales.

3.4.5. Au-delà de la qualité protéique : l'influence du régime alimentaire ?

Si le profil en AA de la protéine de référence s'est progressivement affiné au cours du temps avec l'intégration progressive de nouvelles données relatives aux besoins métaboliques (besoins nets pour chaque AAI), cette protéine idéale a été construite à partir de données provenant de la population générale, c'est-à-dire de personnes consommant une quantité significative de produits d'origine animale.

Sachant que des accommodations métaboliques conduisant à un ajustement en fonction des apports alimentaires ont été établies pour de nombreux nutriments (fer non héminique, iode, zinc, etc.), une telle possibilité ne peut pas être écartée à priori dans le cas des AA (au moins pour certains). C'est par exemple le cas de la taurine (acide 2-aminoéthanesulfonique) qui est un acide aminé qui peut être soit apporté soit synthétisé par les hépatocytes à partir de méthionine et de la cystéine. Cet AA ne se retrouve que dans les produits animaux. Le fait qu'une alimentation à dominante végétale apporte nettement moins de taurine est un phénomène connu de longue date. Ainsi dans la population nord-américaine les apports ont été évalués à 123 mg pour les omnivores, 17 mg pour les lacto-ovo-végétariens et 0 mg pour les végétaliens (Laidlaw et al., 1990). Il existe une régulation de la réabsorption de taurine au niveau rénale permettant soit de limiter les pertes, soit d'éliminer le surplus alimentaire (Tappaz, 2004). Ainsi, si les excrétions urinaires de taurine sont 2 fois moins importantes chez les végétariens que chez les zoophages, le taux plasmatique est peu modifié (Rana and

Sanders, 1986, Laidlaw et al., 1988). La conjugaison des acides biliaires est une autre voie de régulation. Si l'apport en glycine est supérieur à l'apport en taurine, c'est la glycine qui est utilisée (Ridlon, 2016). Certaines données récentes conduisent à envisager qu'une régulation semblable à celle observée pour la taurine puisse exister dans le cas d'autres AA, notamment pour les deux AA qui sont la lysine et la méthionine. Par ailleurs, l'apport énergétique exerce également une influence importante sur le bilan azoté. Le bilan énergétique devrait donc être pris en compte quand on veut mesurer celui-ci. Un changement important dans l'alimentation peut affecter le bilan azoté qui peut mettre plus d'un mois pour se stabiliser. L'ensemble de ces données est en faveur d'un phénomène adaptatif dans l'utilisation des acides aminés en fonction des apports alimentaires (Millward, 2012).

A ce sujet, une étude statistiquement solide a été publiée en 2016 à partir de données issues de la cohorte EPIC-Oxford (Royaume-Uni, 1993-2001) (Schmidt et al., 2016). Dans ce travail, les concentrations plasmatiques de plusieurs AA ont été comparées aux apports alimentaires chez un total de 392 hommes de 30 à 49 ans sans antécédents de cancer ni de traitement au long cours. Les participants ont été séparés en différents groupes en fonction de leur régime alimentaire : « mangeurs de viande » (n= 98), « pesco-végétarien » (n= 98), « végétarien » (n= 98) et « végétalien » (n= 98). Comme attendu, les personnes végétaliennes et végétariennes ont des apports alimentaires en lysine et méthionine largement inférieurs à ceux des personnes « mangeurs de viande » (pour les végétaliens : -44 % et -47 %, respectivement ; pour les végétariens : -25 % et -26 %, respectivement)¹⁷. En revanche, au niveau de la concentration plasmatique, on ne mesure plus aucune différence significative avec les « mangeurs de viande » que ce soit chez les végétariens ou les pesco-végétariens (pour les végétariens : -3 % pour la lysine et +5 % pour la méthionine ; pour les pesco-végétariens : +1 % pour la lysine et +2 % pour la méthionine). Chez les végétaliens, l'important différentiel observé au niveau des apports est significativement moindre au niveau de la concentration plasmatique (-13 % pour la lysine et -8 % pour la méthionine).

Une autre étude comportant 36 allemand.es végétalien.es et 36 consommateur.rices de viande a retrouvé également des apports en AA significativement distincts (Dietrich et al., 2022) : -37,5 % pour l'histidine, - 48 % pour la lysine, -51,9 % pour la méthionine, -27 % pour la proline et -37,2 % pour la tyrosine, tous en défaveur des végétalien.nes. Si ces apports sont moindres, ils restent dans les recommandations établies par l'OMS (à part peut-être pour une végétalienne concernant la lysine). Concernant les concentrations plasmatiques en acides

¹⁷ À ce sujet, les auteurs envisagent que les apports protéiques des personnes végétaliennes et végétariennes enregistrés dans cette étude soient légèrement minorés en raison de contraintes méthodologiques inhérentes au questionnaire utilisé pour réaliser l'enquête alimentaire. En effet, dans ce questionnaire, certaines sources protéiques végétales ne peuvent être comptabilisées car non disponibles dans les banques de données ; de plus, la taille retenue par défaut pour les portions végétales est celle couramment appliquée pour les « mangeurs de viande » alors qu'il est vraisemblable que les personnes végétariennes et végétaliennes consomment des portions sensiblement plus grandes.

Par ailleurs, pour les pesco-végétariens, les apports alimentaires en lysine et méthionine sont proches de ceux évalués pour les « mangeurs de viande » (-17 % et -18 %, respectivement).

aminés : -25 % pour la lysine, + 13,1 % pour la glutamine et +25,4 % pour la glycine. Ainsi ces données indiquent également une concentration en acide aminé plasmatique très différentes des apports alimentaires. Cette étude retrouve également une composition variable du microbiote en fonction des acides aminés apportés. Ce travail est méthodologiquement moins solide que celui d'EPIC Oxford, cependant son analyse est cohérente.

L'ensemble de ces résultats suggèrent la possibilité d'une accommodation métabolique en réponse au régime alimentaire suivi. En d'autres termes, la consommation d'une ration protéique plus pauvre en lysine et méthionine serait partiellement ou intégralement corrigée par un ajustement à la baisse de la demande métabolique (besoin net). En conséquence, si cette chute des besoins nets en lysine et méthionine devait être confirmée par d'autres travaux, il deviendrait alors pertinent de proposer une nouvelle protéine de référence adaptée au métabolisme singulier des personnes adoptant une alimentation végétalienne ou végétarienne (cette protéine de référence spécifique présenterait notamment un profil en AA moins exigeant pour la lysine et la méthionine).

3.4.6. Conclusion

Les travaux évaluant la qualité protéique directement chez l'humain sont peu nombreux. Ils permettent une analyse restreinte à une faible variété d'aliments végétaux. En se référant aux protéines animales (d'œuf ou de lait), la qualité des légumineuses est en général évaluée à 90-100 % et celle des céréales est considérée comme légèrement inférieure, comprise dans une fourchette allant de 70 à 90 %.

Afin de pouvoir accéder à la qualité protéique de n'importe quel aliment, des méthodes de calculs ont été développées depuis une trentaine d'années. Elles utilisent les notions de digestibilité et d'Indice Chimique (IC). Concernant les mesures de digestibilité, les différents résultats obtenus chez l'humain conduisent à envisager qu'il existe très peu, voire aucune, différence de digestibilité globale entre les aliments d'origine animale et ceux provenant des végétaux. Les calculs de l'IC de différents végétaux consommés démontrent que nombre de ces aliments apportent l'ensemble des AAI dans des proportions optimales et ceci sans forcément recourir à la complémentation entre céréales et légumineuses ([Erbersdobler et al., 2017](#) ; [de Gavelle, 2017](#)).

L'analyse de l'ensemble des données actuellement disponibles nous invite à reconsidérer notre perception des protéines végétales. En effet, l'ancienne vision caricaturale opposant les protéines animales d'excellente qualité aux protéines végétales de mauvaise qualité apparaît complètement dépassée, au moins depuis la fin du siècle dernier ([Young et Pellet, 1994](#)).

Enfin, au-delà de la qualité protéique, une accommodation du métabolisme de certains AAI en réponse à l'adoption d'une alimentation végétarienne et végétalienne peut être envisagée.

Si ce mécanisme était confirmé par de nouvelles données, cela pourrait conduire à revoir à la baisse les exigences de la protéine de référence (notamment pour la lysine et la méthionine) en cas de végétarisme et, surtout, de végétalisme.

4. La quantité de protéines dont le corps humain a besoin

En se basant sur le principe du bilan azoté nul, la quantité de protéine journalière a pu être déterminée par une méta-analyse portant sur un échantillon de 235 individus (Rand WM et al., 2003 ; FAO/OMS, 2007). Étant donné la répartition normale (ou gaussienne) de cette courbe de distribution interindividuelle en besoin protéique, le besoin moyen protéique à l'échelle d'une population correspond également au besoin médian (permettant de couvrir les besoins de 50 % de la population). Ce besoin moyen est évalué à 0,66 g/kgpc/j pour une personne en bonne santé (FAO/OMS 2007, Table 23). Autrement dit, une consommation protéique de 0,66 g/kgpc/j est considérée comme suffisante (c'est-à-dire à l'origine d'un bilan azoté nul ou positif) pour la moitié de la population et insuffisante pour l'autre moitié.

La variabilité interindividuelle empêchant une quantification précise pour chaque organisme, la stratégie retenue pour satisfaire aux besoins d'un maximum de personnes consiste à fixer un seuil suffisamment élevé, quitte à dépasser amplement les besoins réels d'une majorité d'individus. Ainsi, une consommation dite «de sûreté», correspondant à une couverture des besoins de 97,5 % de la population, est calculée à partir de la valeur moyenne en lui ajoutant environ 25 % (soit 2 écarts types) (FAO/OMS, 2007). Cette quantité de sûreté peut s'exprimer à l'échelle de l'individu comme étant une valeur permettant dans plus de 97,5 % des cas de subvenir aux besoins protéiques soit $0,66 \times 1,25 = 0,83 \text{ g/kgpc/j}$ (pour une personne en bonne santé). Il est donc intéressant d'avoir à l'esprit que cette recommandation de sûreté à une forte probabilité d'être supérieure aux besoins réels d'un individu pris au hasard, sans pour autant être préjudiciable en cas de bonne santé (FAO/OMS, 2007). Ce point permet d'expliquer comment certaines personnes peuvent présenter une santé optimale avec des apports protéiques bien inférieurs à ce seuil de sûreté qui doit donc davantage être considéré comme une mesure de précaution à l'échelle d'une population plutôt qu'une évaluation précise des besoins d'un organisme en particulier.

Il faut noter cependant que, suite à de nouvelles analyses des données utilisées par la FAO/OMS, des auteurs évaluent le besoin protéique moyen à un niveau sensiblement plus élevé. Ainsi, selon la méthode de calcul appelée IAAO (Indicator Amino Acid Oxidation), Elongo (Elongo et al., 2010) obtient un besoin médian compris entre 0,91 et 0,93 g/kgpc/j conduisant à des consommations de sûreté de 1 et 1,2 g/kgpc/j, respectivement. Mais

attention, retenir une valeur de sûreté plus élevée reviendrait mécaniquement à considérer des profils protéiques de référence bien moins exigeants¹⁸ que ceux établis avec le seuil de 0,83 g/kgpc/j (tableau 2) puisque les quantités d'AAI (exprimées en mg d'AAI/kgpc/j) permettant d'atteindre la valeur de sûreté restent quant à elles inchangées (tableau 1).

Pour la suite, il conviendra donc de garder à l'esprit que l'évaluation de la qualité de l'alimentation par la mesure de son IC global n'a de sens qu'en se basant sur une valeur de sûreté correspondant à celle utilisée pour établir les profils des protéines de référence soit 0,83 g/kgpc/j. À titre de comparaison (tableau 8), la nouvelle fourchette recommandée par l'Anses pour les apports protéiques se situe entre 10 et 20 % de l'AET, ce qui conduit donc, dans une très grande majorité de cas, à dépasser le seuil de sûreté fixé par l'OMS (0,83 g/kgpc/j). Seul un contexte de dépense énergétique particulièrement faible et d'apport protéique proche de la limite basse (soit 10 % de l'AET) conduira à ne pas dépasser la valeur de sûreté de 0,83 g/kgpc/j. De ce fait, une limite inférieure à 12 % de l'AET est préférable pour les personnes les plus sédentaires. Par ailleurs, pour les sujets présentant un excès de masse grasse, l'apport protéique recommandé ne devrait pas être déterminé en se référant à leur poids, mais plutôt par rapport à l'AET (AFSSA, 2007).

Tableau 8 : les besoins protéiques : quelques repères quantitatifs

Ces repères ont été établis en considérant 2 jeux de données :

- *La masse et le besoin énergétique théoriques utilisés par l'Anses pour établir ses dernières recommandations de consommation (Anses, 2016)*
- *La masse et l'apport énergétique moyen observés dans le dernier rapport INCA3 sur les habitudes alimentaires des Français (INCA3, 2017)*

¹⁸ Les quantités de chaque AAI dans le profil protéique de référence (exprimée en mg d'AAI/g de protéine) sont calculées en divisant la quantité d'AAI nécessaire pour atteindre la valeur de sûreté (exprimées en mg de l'AAI/kgpc/j) par la valeur de sûreté (exprimée en g de protéine/kgpc/j). Ainsi, une valeur de sûreté de 1,2 g/kgpc/j conduira à un profil protéique bien moins contraignant où les quantités de chaque AAI ne représentent plus que 70 % ($0,66/0,93=0,83/1,2=0,7$) de celles établies dans le tableau 2.

Masse et besoin énergétique théoriques fixés par l'ANSES		Masse et apport énergétique réels issus du rapport INCA3 sur la population française	
Homme (69 kg ; 2600 Cal)	Femme (58 kg ; 2100 Cal)	Homme (80,3 kg ; 2325 Cal)	Femme (67,3 kg ; 1750 Cal)
0,83 g/kg/jour = 57 g/jour = 8,8 % AET	0,83 g/kg/jour = 48 g/jour = 9,1 % AET	0,83 g/kg/jour = 66,5 g/jour = 11,5 % AET	0,83 g/kg/jour = 56 g/jour = 12,8 % AET
1,2 g/kg/jour = 83 g/jour = 12,8 % AET	1,2 g/kg/jour = 70 g/jour = 13,3 % AET	1,2 g/kg/jour = 96,5 g/jour = 16,6 % AET	1,2 g/kg/jour = 81 g/jour = 18,5 % AET
10% AET = 65 g/jour = 0,94 g/kg/jour	10% AET = 52,5 g/jour = 0,91 g/kg/jour	10% AET = 58 g/jour = 0,72 g/kg/jour	10% AET = 44 g/jour = 0,65 g/kg/jour
20% AET = 130 g/jour = 1,88 g/kg/jour	20% AET = 105 g/jour = 1,81 g/kg/jour	20% AET = 116 g/jour = 1,44 g/kg/jour	20% AET = 87,5 g/jour = 1,30 g/kg/jour

Pour les individus en bonne santé, il semble qu'un excès protéique allant jusqu'à au moins le double de la valeur de sûreté ($\geq 1,66$ g/kgpc/j) ne soit pas préjudiciable pour la santé (OMS, 2007). Ainsi, une limite supérieure de consommation fixée à 20 % de l'AET paraît constituer un bon repère pour la majorité de la population. Quant au seuil de sûreté de 1,2 g/kgpc/j recommandé par certains auteurs (Elongo et al., 2010 ; Pencharzt et al., 2016), il correspond généralement à un apport situé dans une fourchette allant de 13 à 18,5 % de l'AET, ce qui reste parfaitement conforme aux dernières recommandations de l'Anses.

Il est quelquefois préconisé un apport protéique légèrement majoré dans le cadre d'une alimentation végétalienne. Cette position vise à compenser une qualité des protéines végétales qui serait légèrement inférieure à celles issues des produits animaux. Ainsi, certains auteurs (Norris et Messina, 2011 « Vegan for Life » repris dans la 2^e édition de 2020) et certaines organisations de professionnels de la nutrition comme l'Academy of Nutrition and Dietetics (AND)¹⁹, dans leur avis de 2003 et 2009, conseillent d'augmenter la consommation protéique quand celle-ci est dépourvue d'aliment d'origine animale. Cependant, la position de l'AND a largement évolué dans le temps. Elle recommandait en 2003, une majoration de 15-20 % de la ration protéique. En 2009, sa position est devenue plus prudente puisqu'elle ne cite plus de chiffre et renvoie directement au rapport de l'OMS de 2002 sur ce sujet qui conseille effectivement une majoration de la consommation protéique tout en avouant être incapable de quantifier cet ajustement (OMS, 2002). Dans leur dernier rapport (2016), il convient de remarquer qu'il n'est plus mention de la nécessité d'une majoration des apports protéiques (AND, 2016).

Préconiser une majoration de la consommation protéique chez les végétaliens nous semble une précaution peu pertinente dans la mesure où elle suppose un remplacement des produits animaux par des aliments de digestibilité sensiblement plus faible et/ou avec IC

¹⁹ Anciennement American Dietetic Association (ADA)

moyen <1. Cette possibilité revient à substituer les aliments d'origine animale majoritairement par certains produits céréaliers (tableaux 5 et 7), ce que nous ne conseillons pas ici. Mais surtout, cette hypothèse ne résiste pas aux données expérimentales. En effet, dans une méta-analyse réalisée par Rand (à l'origine des dernières recommandations officielles retenues par l'OMS depuis 2007), la comparaison d'une alimentation végétalienne avec une alimentation contenant des produits animaux ne mesure aucune différence significative au niveau des bilans azotés (Rand et al., 2003, OMS 2007). Ces résultats confirment que les différences de digestibilité mesurées entre les aliments d'origine animale et certains végétaux ne sont plus significatives à l'échelle de la ration alimentaire, comme ceci sera d'ailleurs précisé dans le rapport de l'OMS de 2007 (OMS, 2007). C'est également pourquoi l'OMS ne préconise pas d'ajustement de l'apport protéique journalier de référence (apport de sûreté de 0,83 g/kgpc/j) en fonction de la nature de la diète suivie, sous réserve d'une alimentation suffisamment diversifiée (typiquement, avec un apport suffisant de légumineuses pour les alimentations basées sur les végétaux). Dans le même ordre d'idée, il convient de préciser que la méta-analyse réalisée par l'équipe de Rand s'appuie sur des études considérant des alimentations végétaliennes équilibrées associant légumineuses et céréales (Rand et al, 2003). Ce dernier point nous rappelle que, pour être pertinente, une analyse nutritionnelle doit toujours examiner conjointement la quantité et la qualité des protéines consommées.

Ainsi, compte tenu des données dont nous disposons, il ne nous semble pas nécessaire d'ajuster à la hausse les recommandations protéiques standards (0,83 g/kgpc/j) en cas d'alimentation végétalienne. Nos recommandations protéiques seront donc calquées sur celles de l'Anses.

4.1. Apports protéiques des alimentations végétales

Comme présenté précédemment, la qualité d'une protéine dépend de son profil en AAI (évalué par son IC) et de sa digestibilité. Comme aucune différence significative globale n'est mesurée au niveau de la digestibilité entre les aliments d'origine animale et ceux d'origine végétale, la qualité des protéines végétales sera évaluée uniquement au regard de leur IC. Pour calculer cet indice de qualité, il est nécessaire de déterminer au préalable le profil protéique idéal. Nous avons montré que plusieurs protéines de références peuvent être proposées (tableau 3). Dans cette position, l'analyse de la qualité protéique est réalisée au niveau de la journée, car les données dont nous disposons (Millward et al., 2000 ; Mariotti et al., 2001) suggèrent la possibilité d'un ajustement des besoins en AAI au moins à cette échelle de temps. En effet, cette flexibilité serait rendue possible par l'existence d'un petit stock d'AA libres pouvant être mobilisé par l'organisme en cas de besoin (Mariotti et al., 2017).

4.2 Quand la qualité dépend de la quantité

Un apport protéique journalier sera considéré de qualité optimale s'il fournit tous les AAI en quantité suffisante c'est-à-dire en quantité supérieure ou égale aux valeurs de sûreté, telles que définies précédemment, c'est-à-dire couvrant les besoins d'au moins 97,5 % de la population. En fonction de la protéine de référence utilisée, cela correspond à une certaine quantité journalière (exprimée en mg de l'AAI/kgpc/j) pour chacun des AAI (Tableau 9). Dans cette perspective, un profil protéique journalier déséquilibré pourra être corrigé aisément en augmentant la quantité de protéines consommées à hauteur du déficit. Par exemple, pour compenser un IC global journalier s'élevant à 0,8²⁰, il suffira de majorer sa consommation protéique de 25 % ($=1/0,8$), soit un apport de 1,04 g/kgpc/j ($1,04=0,83 \times 1,25$).

Cette stratégie efficace a cependant un certain nombre de limites, car elle nécessite :

1. Une abondance alimentaire : augmenter l'apport protéique est possible uniquement dans un contexte d'abondance alimentaire, comme c'est le cas pour la majorité des habitants des pays riches, mais pas partout dans le monde ;
2. Un niveau d'activité physique (NAP) suffisant : cet apport protéique supplémentaire peut conduire à un dépassement des besoins caloriques si le NAP est trop faible ;
3. Que le déficit en AAI ne soit pas être trop marqué : un IC global journalier de trop faible qualité nécessiterait, pour compenser, une consommation protéique particulièrement élevée risquant de déséquilibrer l'ensemble de la ration et conduisant à une excrétion azotée potentiellement préjudiciable pour l'organisme²¹ ;
4. L'absence de certaines pathologies : l'augmentation de la ration protéique journalière peut être délétère dans le cas de certaines pathologies (insuffisance rénale, etc.).

En conséquence, deux niveaux d'exigence doivent être considérés concernant la qualité protéique d'une ration journalière :

²⁰ Dans la pratique, un tel IC déficitaire sera observé uniquement dans le cas d'une alimentation végétalienne déséquilibrée, trop pauvre en légumineuses et/ou en légumes et trop riche en certaines céréales comme le blé (tableaux 3 et 3bis).

²¹ Une surcharge en déchets azotés est notamment rencontrée dans les deux configurations suivantes :

1. En cas d'apports protéiques en quantité supérieure aux besoins ;
2. En cas d'apports protéiques d'une qualité sous-optimale (IC moyen de la ration journalière < 1) et ceci quel que soit la quantité consommée (même pour un niveau de consommation inférieur aux besoins). En effet, l'existence d'un ou plusieurs AAI limitants fait qu'une partie de la ration protéique ne pourra pas participer aux nécessaires synthèses protéiques (anabolisme). L'ampleur de cette fraction directement catabolisée sera inversement proportionnelle à l'IC moyen journalier (pour des valeurs <1). Cette limite sera surtout importante pour les personnes visant un apport protéique élevé (ex : 1,6 g/kgpc/j), comme par exemple dans le cadre de certains entraînements sportifs (ex : si l'IC global est de 0,7, alors l'apport protéique devra être de $1,6 \times (1/0,7) = 2,3$ g/kgpc/j).

1. Un niveau inférieur : une alimentation doit apporter des quantités d'AAI dépassant les valeurs de sûreté pour chaque AAI. Ces valeurs peuvent être calculées en multipliant les besoins en mg/kgpc/j (tableau 9) par la masse corporelle de la personne considérée. En fonction de la protéine de référence considérée (tableau 9), la quantité totale d'AAI²² devant être apportée est comprise entre 230,5 mg/kgpc/j (FAO, 2007 et 2013) et 143 mg/kgpc/j (Millward, 2012 bis).
2. Un niveau supérieur : en plus de garantir les exigences du niveau inférieur (c'est-à-dire des apports suffisants pour tous les AAI), une alimentation optimale devra également apporter l'ensemble des AAI dans des proportions optimales afin de minimiser le catabolisme protéique. D'un point de vue pratique, cette alimentation devra obtenir un IC ≥ 1.

Afin de prendre le maximum de précautions dans nos recommandations, nous nous fixons ce niveau supérieur d'exigence. De plus, nous utiliserons la protéine de référence la plus exigeante, à savoir celle proposée par l'OMS en 2007 et 2013 avant correction (tableau 3).

Tableau 9 : profils protéiques de référence

Acides Aminés Indispensables (AAI)	FAO 2007			FAO 2007 corrigé ³		Millward 2012	
	mg /g de protéine de référence ¹	mg /kg de masse corporelle / jour ¹	mg /kg de masse corporelle / jour ²	mg /g de protéine de référence ²	mg /kg de masse corporelle / jour ²	mg /g de protéine de référence ²	mg /kg de masse corporelle / jour ²
<i>Histidine (His)</i>	15	10	12,5	12	10	12	10
<i>Isoleucine (Iso)</i>	30	20	25	24	20	22	18
<i>Leucine (Leu)</i>	59	39	49	47	39	31	26
<i>Lysine (Lys)</i>	45	30	37,5	36	30	23	19
Méthionine + Cystéine = Soufrés (Souf)	22	15	19	18	15	19	16
<i>Phénylalanine + Tyrosine = Aromatiques (Arom)</i>	38	25	31	30	25	24	20

²² Pour des valeurs de sûreté plus élevées que celle retenue ici (0,83 g/kgpc/j), comme il est proposé par certains auteurs (Elongo et al., 2010 ; Penchartz et al., 2016), la quantité de chaque AAI dont le corps a besoin (exprimée en mg/kgpc/j) reste inchangé, mais le profil de la protéine de référence (exprimée en mg/g de protéine de référence) en sera affecté (quantités d'AAI plus faibles) de façon inversement proportionnelle à l'augmentation de la valeur de sûreté.

Thréonine (Thr)	23	15	19	18	15	19	16
Tryptophane (Trp)	6	4	5	5	4	5	4
Valine (Val)	39	26	32,5	31	26	17	14
Total	277	184	230,5	221	184	196	143

¹ Profil protéique établi en considérant une consommation protéique médiane (0,66 g/kgpc/j)

² Profil protéique établi en considérant une consommation protéique de sûreté (0,83 g/kgpc/j)

³ Correction en considérant que les valeurs retenues par le comité d'expert de la FAO (2007) correspondent à des valeurs de sûreté (0,83 g/kgpc/j)

4.3. Limite supérieure de sécurité (LSS)

Il ne semble pas y avoir de limite supérieure de sécurité pour chacun des acides aminés pris individuellement. Concernant la quantité totale de protéine, il est possible de raisonner en se basant sur les capacités d'uréogénèse du foie. Pour la majorité des individus, l'AFSSA définit trois domaines de consommation protéique et un seuil haut de 3,5 g/kgpc/j. Ainsi, entre 0,83 et 2,2 g/kgpc/j, les apports peuvent être qualifiés de "satisfaisants", entre 2,2 et 3,5 g/kgpc/j, d'apports "élevés" et au-delà de 3,5 g/kgpc/j, d'apports "très élevés" (AFSSA 2007). Pour les personnes âgées, il est très probable que ce seuil haut de 3,5 g/kgpc/j puisse être abaissé (Walrand et al., 2005). Les apports nutritionnels conseillés pour les sportifs d'endurance peuvent être compris entre 1,2 et 1,4 g/kgpc/j. Ces valeurs varient en fonction du niveau d'entraînement. Ces fourchettes de valeurs sont applicables à des sportifs dont la charge d'entraînement est au moins de 1-2 h/j, 4-5 jours par semaine. Pour les athlètes confirmés dans les disciplines de force, les apports protéiques conseillés par l'AFSSA sont de 1,3-1,5 g/kgpc/j (AFSSA, 2007). Ces apports pourront être temporairement majorés dans le but de développer la masse musculaire. Ils ne devraient cependant pas dépasser 2,5 g/kgpc/j et pour une durée n'excédant pas 6 mois (AFSSA, 2007). Toutefois, une revue systématique de la littérature plus récente rapporte qu'un apport protéique supérieur à 1,6 g/kgpc/j n'apporte pas d'augmentation de la masse musculaire (Morton, 2018).

L'Anses retient depuis 2016 un intervalle de référence de 10 à 20 % de l'AET pour les adultes. L'agence estime qu'il est difficile de définir une LSS pour l'apport protéique et fixe des limites inférieures et supérieures d'apports égales à 0,83 et 2,2 g/kgpc/j de protéines (soit de 10 à 27 % de l'apport énergétique). La limite basse de la référence nutritionnelle en protéines chez les personnes âgées est légèrement plus élevée, de l'ordre de 1 g/kgpc/j, ainsi que chez les femmes enceintes et allaitantes, au moins 70 g/j ou 1,2 g/kgpc/j.²³

²³ <https://www.anses.fr/fr/content/les-protéines>

Une revue de la littérature indique qu'il n'y a aucun intérêt à conseiller une consommation supérieure aux recommandations de sûreté (0,83 g/kgpc/j). Une consommation de protéine au-delà de ce seuil pourrait conduire à différents problèmes de santé. En effet, il existe alors une surcharge métabolique pour le foie, les reins, une perte de la réserve en calcium dans les os, un risque accru de maladie cardio-vasculaire et de cancer (Delimaris, 2013). En parallèle de la quantité de protéines, leur origine animale ou végétale semble avoir des impacts différents sur la santé (Richter 2015 ; Tharrey, 2018 ; Tharrey et al. 2019). Cela sera discuté dans une autre position de l'ONAV.

4.4. L'alimentation végétale équilibrée : des apports protéiques optimaux en quantité et en qualité

Nous avons établi que de nombreuses céréales présentent un déficit plus ou moins marqué en lysine (tableau 5). Comme nous l'avons d'ores et déjà précisé, notons ici que l'importance de ce déficit est très discutée par les experts. En effet, l'ampleur du déficit en lysine et le nombre de céréales concernées varient grandement en fonction de la protéine de référence considérée (tableau 10). Encore une fois, nous retenons, par précaution, la protéine de référence qui se trouve être la plus défavorable pour les protéines végétales, à savoir celle définie par l'OMS en 2007.

Rappelons que nous nous focalisons ici uniquement sur la lysine, car nous avons montré précédemment que les autres AAI n'étaient pas limitants dans le cadre d'une alimentation végétale équilibrée où une variété suffisante de légumineuses est consommée. Il convient donc d'établir si la consommation des autres sources protéiques d'origine végétale permet de compenser ce déficit relatif en lysine. Pour ce faire, nous avons procédé en trois étapes. En premier lieu, la moyenne de l'IAAS de la lysine a été calculée pour les différentes catégories alimentaires (tableau 10). Nous avons ensuite évalué la contribution relative de chacun de ces groupes alimentaires (IAAS relatif de la lysine) aux besoins journaliers en lysine (tableau 11). Enfin, nous avons réalisé la somme de ces indices relatifs pour les différentes rations examinées (tableau 12). Si cet IAAS global de la lysine dépasse la valeur de 1, nous pouvons en déduire que les apports alimentaires en lysine couvrent l'ensemble des besoins métaboliques (besoins nets) et, de façon plus générale, que la qualité des apports protéiques est optimale ($IC \geq 1$).

Compte tenu des besoins quantitatifs précédemment définis, trois niveaux d'apport protéique total (50 g, 75 g et 100 g) ont été examinés, nous permettant au passage de construire certains des repères de consommation que nous recommandons par ailleurs pour équilibrer une alimentation végétale.

Tableau 10 : calcul de l'IAAS de la lysine pour les différentes familles d'aliments

Pour un aliment donné, le score IAAS de la Lysine est calculé en divisant sa quantité effective dans l'aliment par sa quantité théorique au sein de la protéine de référence. Pour ce faire deux protéines de référence différentes sont utilisées :

1. La protéine de référence proposée par le comité OMS en 2007 : **les scores IAAS ainsi calculés sont indiqués en gras** ;
2. La protéine de référence proposée par Millward en 2012 : les scores IAAS ainsi calculés sont indiqués en italique.

Les scores très excédentaires (IAAS > 1,5) sont notés sur fond **vert foncé**

Les scores excédentaires (1 < IAAS < 1,5) sont notés sur fond **vert clair**

Les scores déficitaires (0,5 < IAAS < 1) sont notés sur fond **jaune**

Les scores très déficitaires (IAAS < 0,5) sont notés sur fond **orangé**

Aliment		IAAS de la lysine calculé à partir de 2 protéines de référence	
		<i>OMS 2007</i> - <i>Millward 2012</i>	<i>Moyenne</i>
Légumineuses	<i>Pois chiche (bouillis)</i>	1,49 - 2,91	1,45 - 2,84
	<i>Haricots blancs (bouillis)</i>	1,53 - 2,99	
	<i>Lentilles vertes (graines bouillies)</i>	1,55 - 3,03	
	<i>Tofu (précipitation au nigari)</i>	1,24 - 2,43	
Céréales (et assimilés)	<i>Quinoa (bouilli)</i>	1,17 - 2,29	0,72 - 1,41
	<i>Avoine (grains entiers)</i>	0,92 - 1,80	
	<i>Maïs (grains entiers cuits)</i>	0,92 - 1,80	
	<i>Riz Blanc (bouilli)</i>	0,80 - 1,57	
	<i>Triticale (farines)</i>	0,62 - 1,22	
	<i>Seigle (farine complète)</i>	0,47 - 0,91	
	<i>Blé (farines à pain)</i>	0,43 - 0,84	
	<i>Millet (bouilli)</i>	0,42 - 0,83	
Fruits à coque	<i>Pistaches (crues)</i>	1,26 - 2,46	0,90 - 1,76
	<i>Noix de cajou (crues)</i>	1,13 - 2,22	
	<i>Noix de Grenoble (crues)</i>	0,62 - 1,21	
	<i>Amandes (crues)</i>	0,60 - 1,17	
Légumes (et assimilés)	<i>Epinards (bouillis)</i>	1,36 - 2,67	1,25 - 2,44
	<i>Spiruline (algue sèche ou fraîche)</i>	1,17 - 2,29	
	<i>Choux verts « kale » (cuits)</i>	1,33 - 2,61	
	<i>Algues Emi-Tsunomata de culture</i>	1,09 - 2,13	
	<i>Chou-fleur (cuit)</i>	1,20 - 2,34	
	<i>Salade verte (laitue crue)</i>	1,37 - 2,69	
	<i>Oignons (bouillis)</i>	1,06 - 2,08	
	<i>Choux de Bruxelles (cuits)</i>	1,01 - 1,98	

	<i>Carottes (crues)</i>	2,41 - 4,71	
	<i>Pommes de terre sans peau (bouillies)</i>	1,36 - 2,65	
	<i>Poivrons (crus)</i>	0,80 - 1,57	
	<i>Ch. de Paris (cru)</i>	1,29 - 2,52	
	<i>Ch. de Paris (grillé)</i>	0,74 - 1,46	
Fruits	<i>Airelles (crues)</i>	1,88 - 3,69	1,39 - 2,71
	<i>Bananes (crue)</i>	1,02 - 2,00	
	<i>Oranges (crue)</i>	1,11 - 2,17	
	<i>Abricots (cru)</i>	1,54 - 3,00	
Origine animale	<i>Lait entier de vache</i>	1,86 - 3,64	1,85 - 3,61
	<i>Œuf de poule entier et cuit (dur)</i>	1,60 - 3,13	
	<i>Poissons blancs (mélange cuit)</i>	2,04 - 4,00	
	<i>Poulet (viande rôtie / sans la peau)</i>	1,89 - 3,70	
	<i>Bœuf 20% MG (viande cuite)</i>	1,84 - 3,60	

Tableaux 11 : IAAS relatif de la Lysine pour des rations protéiques de 50 g/j, 75 g/j et 100 g/j

Afin d'établir si la consommation des différentes sources protéiques d'origine végétale permet de consommer la quantité de lysine recommandée par l'OMS en 2007 (45 mg/g de protéine), le calcul d'un IAAS relatif a été réalisé pour chacun des groupes alimentaires. Les apports de lysine pourront être considérés comme optimaux si l'addition des différents IAAS contributifs conduit à obtenir un IAAS global supérieur ou égal à 1. Trois niveaux d'apport protéique total (50 g, 75 g et 100 g) ont été examinés. Le nombre de portions recommandées pour chaque niveau d'apport protéique est écrit en vert pour les aliments végétaux et en rouge pour les produits d'origine animale. Les tailles des différentes portions sont celles utilisées par l'Anses lors de sa dernière enquête alimentaire INCA3 (INCA3, 2017) : une portion de légumineuses, de céréales, de légumes ou de produits animaux correspond à 100 g d'aliments ; une portion d'oléagineux correspond à 15 g ; une portion de fruits correspond à 150 g.

Groupe alimentaire	IAAS Lys (OMS 2007)	Nombre de portion Apport protéique - Apport calorique IAAS relatif pour une ration protéique de 50 g/jour					
		1	2	3	4	5	6
Légumineuse	1,45	10g - 140Cal 0,290	20g - 280Cal 0,580	30g - 420Cal 0,870	40g - 560Cal 1,160		
Céréale	0,72	9g - 250Cal 0,130	18g - 500Cal 0,259	27g - 750Cal 0,389	36g - 1000Cal 0,518	45g - 1250Cal 0,648	
Fruits à coque (oléagineux)	0,9	3g - 90Cal 0,054	6g - 180Cal 0,108	9g - 270Cal 0,162			

Légume	1,25			6g - 105Cal 0,125	8g - 140Cal 0,200	10g -175Cal 0,250	12g - 210Cal 0,300
Fruit	1,39	1,3g - 85Cal 0,035	2,6g - 170Cal 0,070	3,9g - 255Cal 0,105			
Origine Animale	1,85	18g - 170Cal 0,666	36g - 340Cal 1,332				

Groupe alimentaire	IAAS Lys (OMS 2007)	Nombre de portion Apport protéique - Apport calorique IAAS relatif pour une ration protéique de 75 g/jour					
		1	2	3	4	5	6
Légumineuse	1,45	10g - 140Cal 0,195	20g - 280Cal 0,385	30g - 420Cal 0,580	40g - 560Cal 0,773	50g - 700Cal 0,967	
Céréale	0,72	9g -250Cal 0,086	18g - 500Cal 0,173	27g - 750Cal 0,259	36g - 1000Cal 0,346	45g - 1250Cal 0,432	54g - 1500Cal 0,518
Fruits à coque (oléagineux)	0,9	3g - 90Cal 0,036	6g -180Cal 0,072	9g - 270Cal 0,108			
Légume	1,25			6g - 105Cal 0,100	8g - 140Cal 0,133	10g -175Cal 0,167	12g - 210Cal 0,200
Fruit	1,39	1,3g - 85Cal 0,024	2,6g - 170Cal 0,048	3,9g - 255Cal 0,072			
Origine Animale	1,85	18g - 170Cal 0,444	36g - 340Cal 0,888	54g - 510Cal 1,332			

Groupe alimentaire	IAAS Lys (OMS 2007)	Nombre de portion Apport protéique - Apport calorique IAAS relatif pour une ration protéique de 100 g/jour					
		1	2	3	4	5	6
Légumineuse	1,45	10g - 140Cal 0,145	20g - 280Cal 0,290	30g - 420Cal 0,435	40g - 560Cal 0,580	50g - 700Cal 0,725	60g - 840Cal 0,870
Céréale	0,72	9g -250Cal 0,065	18g - 500Cal 0,130	27g - 750Cal 0,194	36g - 1000Cal 0,259	45g - 1250Cal 0,324	54g - 1500Cal 0,389
Fruits à coque (oléagineux)	0,9	3g - 90Cal 0,027	6g -180Cal 0,054	9g - 270Cal 0,081			
Légume	1,25			6g - 105Cal 0,075	8g - 140Cal 0,100	10g -175Cal 0,125	12g - 210Cal 0,150
Fruit	1,39	1,3g - 85Cal 0,018	2,6g - 170Cal 0,036	3,9g - 255Cal 0,054			
Origine Animale	1,85	18g - 170Cal 0,333	36g - 340Cal 0,666	54g - 510Cal 0,999	72g - 680Cal 1,332		

Tableau 12. Comparaison de l'IAAS de la lysine pour des rations végétaliennes et incluant des protéines d'origine animale (POA)

- *Rations végétaliennes (VG) : pour une ration de 50 g/j de protéine, la consommation de 2 portions de légumineuses, de 2 portions de céréales, d'1 portion d'oléagineux, de 4 portions de légumes et de 2 portions de fruits permet d'obtenir un IAAS lysine global de 1,143 (pour 1150 Cal). Pour une ration de 75 g/j de protéine, la consommation de 3 portions de légumineuses, de 3 portions de céréales, de 2 portions d'oléagineux, de 5 portions de légumes et de 2 portions de fruits permet d'obtenir un IAAS lysine global de 1,108 (pour 1660 Cal). Pour une ration de 100 g/j de protéine, la consommation de 4 portions de légumineuses, de 4 portions de céréales, de 3 portions d'oléagineux, de 6 portions de légumes et de 2 portions de fruits permet d'obtenir un IAAS lysine global de 1,095 (pour 2170 Cal).*

- *Rations comprenant des protéines d'origine animale (POA) :*
 - *Pour une ration de 50 g/j de protéine, la consommation de 0,3 portion de légumineuses, de 2 portions de céréales, d'1 portion d'oléagineux, de 3 portions de légumes, de 2 portions de fruits et d'1 portion de produits d'origine animale permet d'obtenir un IAAS lysine global de 1,266 (pour 1052 Cal) ;*
 - *Pour une ration de 75 g/j de protéine, la consommation de 0,3 portion de légumineuses, de 3 portions de céréales, d'1 portion d'oléagineux, de 3 portions de légumes, de 2 portions de fruits et de 1,9 portion de produits d'origine animale permet d'obtenir un IAAS Lysine global de 1,333 (pour 1455 Cal) ;*
 - *Pour une ration de 100 g/j de protéine, la consommation de 0,3 portion de légumineuses, de 3 portions de céréales, d'1 portion d'oléagineux, de 3 portions de légumes, de 2 portions de fruits et de 3,3 portions de produits d'origine animale permet d'obtenir un IAAS Lysine global de 1,464 (pour 1692 Cal).*

Les portions appliquées pour les rations "POA" correspondent à celles recommandées dans le dernier rapport de Santé publique France ([Santé publique France, 2019](#)) et qui sont reprises dans la dernière version du PNNS. Notons cependant que ces recommandations officielles françaises parlent de « légumes secs » et non de « légumineuses » ce qui, de fait, exclut le soja des aliments dont la consommation est par ailleurs encouragée (« au moins 2 portions par semaine », soit 0,3 portion par jour). Cette position singulière vis à vis du soja sera discutée dans une autre position de l'ONAV.

Groupe alimentaire	Nombre de portion (p.) - Apport calorique IAAS Lysine (relatif et global) pour une ration protéique de 100 g/jour					
	50 g/j		75 g/j		100 g/j	
	VG	Omni	VG	Omni	VG	Omni
Légumineuse	2 p. - 280 Cal 0,580	0,3 p. - 42 Cal 0,087	3 p. - 420 Cal 0,580	0,3 p. - 42 Cal 0,058	4 p. - 560 Cal 0,580	0,3 p. - 42 Cal 0,044
Céréale	2 p. - 500 Cal 0,259	2 p. - 500 Cal 0,259	3 p. - 750 Cal 0,259	3 p. - 750 Cal 0,259	4 p. - 1000 Cal 0,259	3 p. - 750 Cal 0,194
Fruits à coque	1 p. - 90 Cal 0,054	1 p. - 90 Cal 0,054	2 p. - 180 Cal 0,072	1 p. - 90 Cal 0,036	3 p. - 270 Cal 0,081	1 p. - 90 Cal 0,027
Légume	4 p. - 140 Cal 0,200	3 p. - 105 Cal 0,150	5 p. - 175 Cal 0,167	3 p. - 105 Cal 0,100	6 p. - 210 Cal 0,150	3 p. - 105 Cal 0,075
Fruit	2 p. - 170 Cal 0,070	2 p. - 170 Cal 0,050	2 p. - 170 Cal 0,048	2 p. - 170 Cal 0,033	2 p. - 170 Cal 0,036	2 p. - 170 Cal 0,025
Origine Animale	x	1 p. - 170 Cal 0,666	x	1,9 p. - 323 Cal 0,844	x	3,3 p. - 560 Cal 1,099
Total	1180 Cal 1,163	1087 Cal 1,266	1695 Cal 1,126	1480 Cal 1,333	2210 Cal 1,106	1717 Cal 1,464

Sans surprise, les rations comprenant des protéines d'origine animale apportent potentiellement des quantités largement suffisantes en lysine (IAAS global de la lysine >1) dans tous les cas examinés (apports protéiques de 50 g/j, 75 g/j et 100 g/j). Quant aux rations exclusivement végétales²⁴, elles semblent également couvrir parfaitement les apports recommandés en lysine, au moins lorsqu'on applique nos recommandations de consommation.

Ainsi, même en appliquant les hypothèses les plus exigeantes (protéine de référence de l'OMS en 2007), il apparaît qu'une alimentation végétale équilibrée est en mesure d'apporter l'ensemble des AAI (y compris la lysine) en proportion et quantité optimales, au même titre qu'une alimentation incluant des protéines d'origine animale.

Maintenant que nous avons vu les besoins en acide aminés pour le renouvellement des protéines de notre organisme et comment les obtenir, il s'agit de faire le point sur les apports en protéines dans la population française et notamment dans des populations particulières qui ont largement végétalisées leur alimentation. Si les apports protéiques provenant du

²⁴ Compte tenu de la plus grande densité protéique des produits d'origine animale, la densité protéique globale des rations végétales (VG) est inférieure à celle des rations incluant des protéines d'origine animale (POA) : ce différentiel se traduit par un apport calorique accru de + 9 % à + 29 %, respectivement pour une ration de 50 g et 100 g de protéine. En conséquence, il convient d'être attentif à cette caractéristique des alimentations végétales afin de ne pas dépasser les besoins énergétiques.

monde végétal²⁵ semblent satisfaire l'ensemble des besoins chez l'adulte, quand est-il pour les âges extrêmes de la vie ou lors de la pratique d'une activité physique soutenue (AFSSA 2007) ?

5. Apports en protéines de la population française

L'Anses mène périodiquement des études pour évaluer l'alimentation des Français. Les études « individuelle nationale des consommations alimentaires » (INCA) nous permettent d'estimer les apports en protéines dans la population française adulte.

Il est parfois délicat de comparer les études INCA. En effet, leur méthodologie est différente : carnet alimentaire de 7 jours pour INCA-1 et INCA-2, rappels de 24h pour INCA-3. Ainsi que le rappelle l'Anses : "La méthode de recueil définie par le projet EU Menu a permis d'améliorer la qualité des données de consommations alimentaires de l'étude INCA-3, avec d'une part un recueil plus exhaustif, notamment pour les consommations hors repas, et d'autre part une description beaucoup plus détaillée des aliments consommés. Ces améliorations participeront à affiner les évaluations de risques futures réalisées à partir des données de l'étude INCA-3. Néanmoins, elles rendent très délicate la comparaison des résultats de l'étude INCA-3 avec ceux des précédentes études INCA, et donc l'étude des évolutions en termes de consommations alimentaires, d'apports nutritionnels ou d'exposition alimentaire aux substances chimiques ou aux agents microbiologiques."²⁶

D'après l'étude INCA-1 (1998-1999)²⁷, l'apport moyen en protéines en France est de 1,4 g/kgpc/j (105 g/j pour les hommes, 82 g/j pour les femmes en moyenne), soit de l'ordre de 17 % des AESA.

D'après l'étude INCA-2²⁸ (2006-2007), l'apport moyen en protéines en France est de 100 g/j pour les hommes (17,2 % des AESA) et de 74,2 g/j (16,7 % des AESA) pour les femmes.

D'après l'étude INCA-3²⁹ (2014-2015), l'apport moyen en protéine en France de 83,2 g/j soit 16,8 % des AESA avec 96 g/j pour les hommes et 71,1 g/j pour les femmes. Les apports moyens des 2 sexes en fonction de l'âge sont :

- 1,34 g/kgpc/j pour les 18-44 ans (83,6g/j ; 16,1 % des AESA)
- 1,31 g/kgpc/j pour les 45-64 ans (84,8 g/j ; 17,3 % des AESA)

²⁵ Dans le contexte diététique, le "monde végétal" est défini par opposition aux aliments d'origine animale. Ces protéines provenant du "monde végétal" peuvent donc effectivement être issues de végétaux mais également de bactéries ou de champignons.

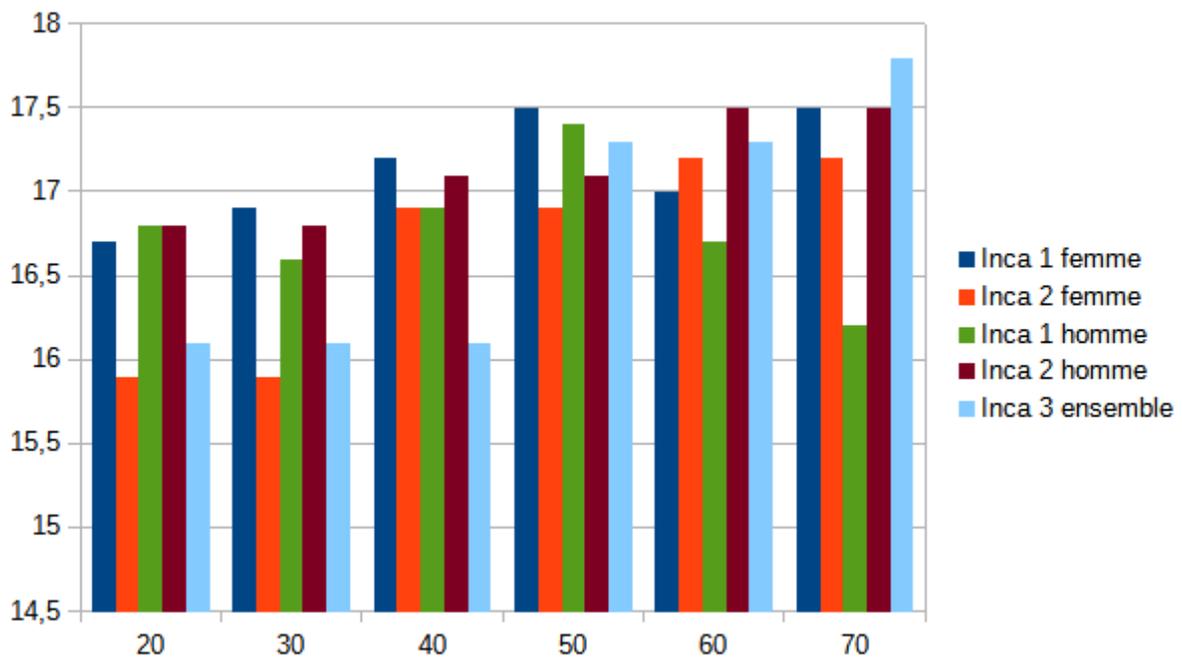
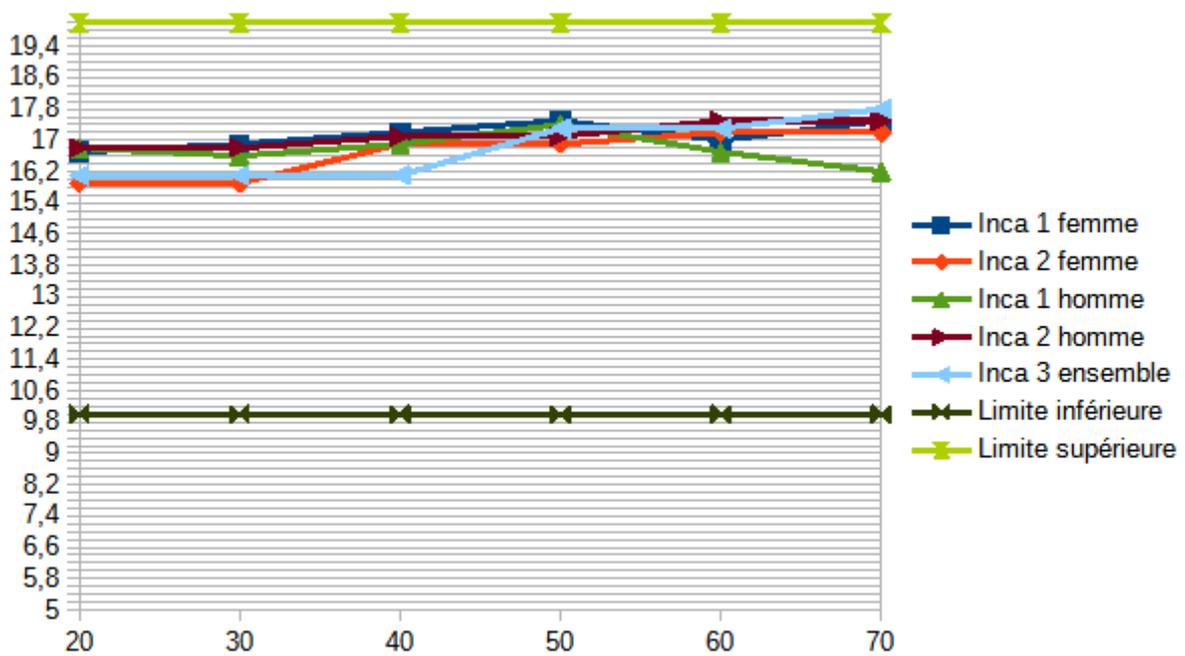
²⁶ <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>

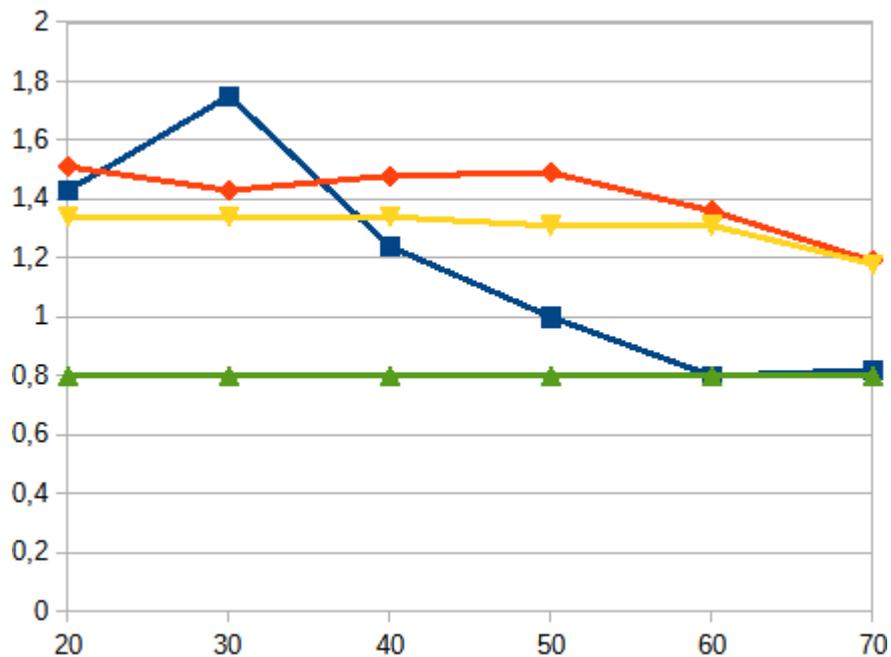
²⁷ <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Proteines.pdf>

²⁸ <https://www.anses.fr/fr/system/files/PASER-Ra-INCA2.pdf>

²⁹ <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>

- 1,18 g/kgpc/j pour les 65-79 ans (78,6 g/j ; 17,8 % des AESA)





Consommation en protéines en kg de poids corporel/j pour les femmes

- Rouge : Inca-1
- Bleu : Inca-2
- Jaune : Inca-3

La consommation reste dans la limite supérieure des apports recommandés en ce qui concerne le pourcentage de protéines par rapport à l'AESA. Cependant une vigilance semble nécessaire concernant les personnes féminines de plus de 60 ans.

Ces données nous indiquent que la population française consomme une quantité dans la partie supérieure des recommandations. La population française est très majoritairement composée de personnes consommant quotidiennement des POA. Quel est l'impact d'une réduction de consommation de POA (végétarisme) ou de l'absence de consommation de POA (végétalisme) sur l'apport protéique observé en pratique ?

5.1. Les protéines dans la population végétarienne

5.1.1. Apport en protéines chez les végétarien.nes

Les études portant sur des populations occidentales ont rapporté des consommations de protéines supérieures aux recommandations (Mariotti, Gardner 2019). L'étude EPIC oxford indique des apports protéiques chez les végétaliens qui sont en moyenne de 0,91 g/kgpc/j

(12,7 % des AET), de 0,95 g/kgpc/j chez les végétariens (13,6 % des AET), de 1,06 g/kgpc/j (15,1 % des AET) chez les mangeurs de poisson et de 1,14 g/kgpc/j (16,5 % des AET) chez les mangeurs de viande. Chez les végétaliennes, les apports en protéines sont en moyenne de 0,99 g/kgpc/j (13,2 % des AET), de 1,05 g/kgpc/j chez les végétariennes (14 % des AET), de 1,2 g/kgpc/j (15,7 % des AET) chez les mangeuses de poisson et de 1,32 g/kgpc/j (17,4 % des AET) chez les mangeuses de viande (Sobiecki, 2016).

Dans l'étude Adventist Health Study 2 les apports en protéines des végétalien.nes sont en moyenne de 72,3 g/j (14,5 % des AET), de 72 g/j (14,4 % AET) chez les végétarien.nes, de 74,3 g/j (14,9 % AET) chez les mangeurs.euses de poisson et de 75,8 g/j (15,2 % AET) chez les mangeurs.euses de viande. Ces différences entre les différents régimes alimentaires ne se révèlent pas significatives dans cette étude (Rizzo, 2013). En Belgique les végétaliens consomment 82 g/j, les végétariens 93 g/j et les omnivores 112 g/j de protéines, en tenant compte des IMC inférieurs chez les végétaliens cette différence est sans doute moins importante qu'il n'y paraît (Clarys et al. 2014). Nous retrouvons des résultats un peu plus faibles dans la cohorte française Nutrinet-santé autour de 0,86 g/kgpc/j. Cette consommation protéique représente 12,8 % des AET chez les végétaliens soit un taux supérieur aux 10 ou 12 % (pour les adultes et les personnes sédentaires et/ou âgées, respectivement) considérés par les experts comme suffisants (Allès et al. 2017). Ainsi on constate que les apports en protéines restent conformes aux recommandations même pour les populations adoptant une alimentation intégralement végétalisée (Clarys et al. 2014 ; Rizzo et al. 2013).

5.1.2. Différences alimentaires des végétarien.nes

Il apparaît inapproprié de réduire les alimentations végétales à des pratiques reposant sur la simple exclusion de certaines catégories alimentaires. En fait, la place accordée aux différents groupes alimentaires y est profondément reconsidérée (Haddad et al., 1999, Larsson et al., 2001). Il en résulte chez les populations mangeuses de viande, végétariennes ou végétaliennes des singularités métaboliques assez marquées, comme l'atteste la différence systématique d'IMC (Spencer et al., 2003, Key et al., 1999). La différence de composition corporelle et d'apport énergétique sont deux exemples de facteurs susceptibles d'affecter le besoin net en protéines ainsi qu'en acides aminés (Millward, 2004). Les différences d'utilisation et de d'action sur le catabolisme des protéines entre les protéines animales et végétales semblent encore peu connues (Fouillet et al., 2002). Les protéines de céréales (riz, maïs, blé) et les protéines animales sont plutôt riches en acides aminés soufrés (3,5 à 5 %), comparativement aux protéines de légumineuses qui ne contiennent que 2 à 3,5 % du couple méthionine / cystéine. Ainsi les sources de protéines modifient le profil des acides aminés présents. Il apparaît important pour une alimentation adéquate nutritionnellement que les apports en protéines soient variés. Si on remplace les protéines animales par des protéines végétales, pour que celles-ci représentent plus de 50 % de l'apport en protéines, par la source principale

actuelle (donc des céréales), on observe une inadéquation due à une trop faible quantité de protéines et non un mauvais profil en acides aminés. Au-delà de 70 % de protéines végétales dans l'alimentation, c'est le profil des acides aminés présent dans les céréales qui ne serait plus optimal (de Gavelle, 2017). Des modélisations réalisées à partir de l'étude Inca-3 montrent que l'augmentation de la consommation de protéines végétales est davantage bénéfique si elle est diversifiée (Salomé, 2020). Il s'agit alors d'avoir des apports à travers les légumineuses, céréales complètes, les fruits à coque et les graines. Quand on regarde les apports des végétaliens, il s'avère que cette recommandation alimentaire est d'ores et déjà appliquée (Allès et al. 2017 ; Bradbury et al. 2017 ; Clarys et al. 2014).

Tableau 13 : Données NutriNet-Santé

L'étude NutriNet-Santé menée en France a comparé les apports en protéines, mais également les différences dans les aliments consommés selon que les personnes se déclarent mangeuses de viande (MV) (n = 90 664 participants), pesco-végétarienne (VGR) (n = 2370), ou végétaliennes (VGL) (n = 789). Ces données reposant sur du déclaratif, il existe de fait des limites. Ainsi pour les personnes végétaliennes on peut constater des apports en protéines animales relativement importants.

	VGL	VGR	MV	Ratio VGR/MV	Ratio VGL/MV
Protéines	62	66,6	80,7	0,83	0,77
% prot/AESA	12,8	14,2	17,6	0,81	0,73

	VGL	VGR	MV	Ratio VGR/MV	Ratio VGL/MV
Fruits	364,2	290,6	245,1	1,19	1,49
Légumes	366	285,8	216,4	1,32	1,69
Céréales	163,2	150,9	158,6	0,95	1,03
Dont Graines et céréales non cuisinées	13	7,6	1,7	4,47	7,65
Légumineuses	73,2	32,8	11,5	2,85	6,37
Fruits à coque	19,6	11,6	4,4	2,64	4,45
Boissons végétales	419,3	160,2	28,5	5,62	14,71
Graines germées	20	7,5	1,9	3,95	10,53

Ainsi les personnes qui déclarent avoir une alimentation végétale sont plus proches des recommandations concernant la consommation de fruits, de légumineuses et de fruits à coque. Plus l'alimentation se végétalise, plus la consommation de ces groupes alimentaires augmente. Encore une fois, il apparaît que les alimentations végétales ne peuvent pas être décrites par la seule suppression de la viande, mais par une modification globale du contenu de l'assiette. Par ailleurs, dans un questionnaire composé de 613 répondant.es végétalien.nes, 29,6 % rapportent manger des algues au moins une fois par semaine (Demange, 2017). Cette consommation n'est pas prise en compte dans INCA-3, ce qui s'explique car moins de 5 % des Français-es consomment des algues à cette fréquence³⁰. La consommation régulière d'algues conduit à des différences au niveau du microbiote intestinale avec une digestion plus complète de celle-ci (Pudlo et al., 2022). L'Anses a émis un avis sur la consommation des algues en limitant les teneurs en iode autorisées pour la commercialisation de celles-ci et en étant attentif au risque de contamination (Anses, 2018).

5.2. Situations spécifiques

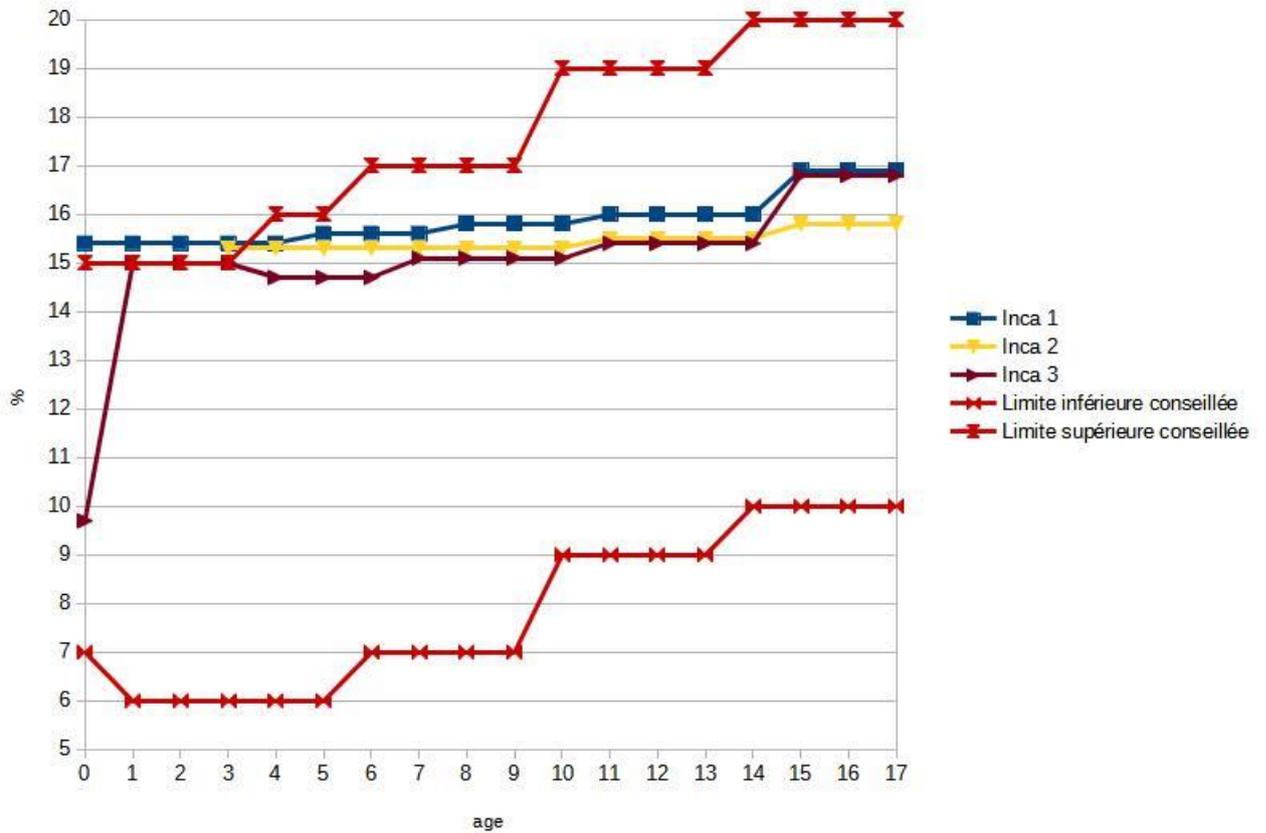
5.2.1. Enfants

La demande énergétique est telle pour les enfants que les besoins en protéines sont abaissés, notamment pour les jeunes enfants. Ainsi, pour les enfants de 0 à 3 ans les protéines devraient être compris entre 6 et 15 % des AET, de 1 an à 3 ans entre 6 et 15 %, entre 4 et 5 ans compris entre 6 et 16 %, de 6 à 9 ans compris entre 7 et 17 %, de 10 à 13 ans entre 9-19 % et à partir de 14 ans de 10 à 20 % comme pour les adultes.

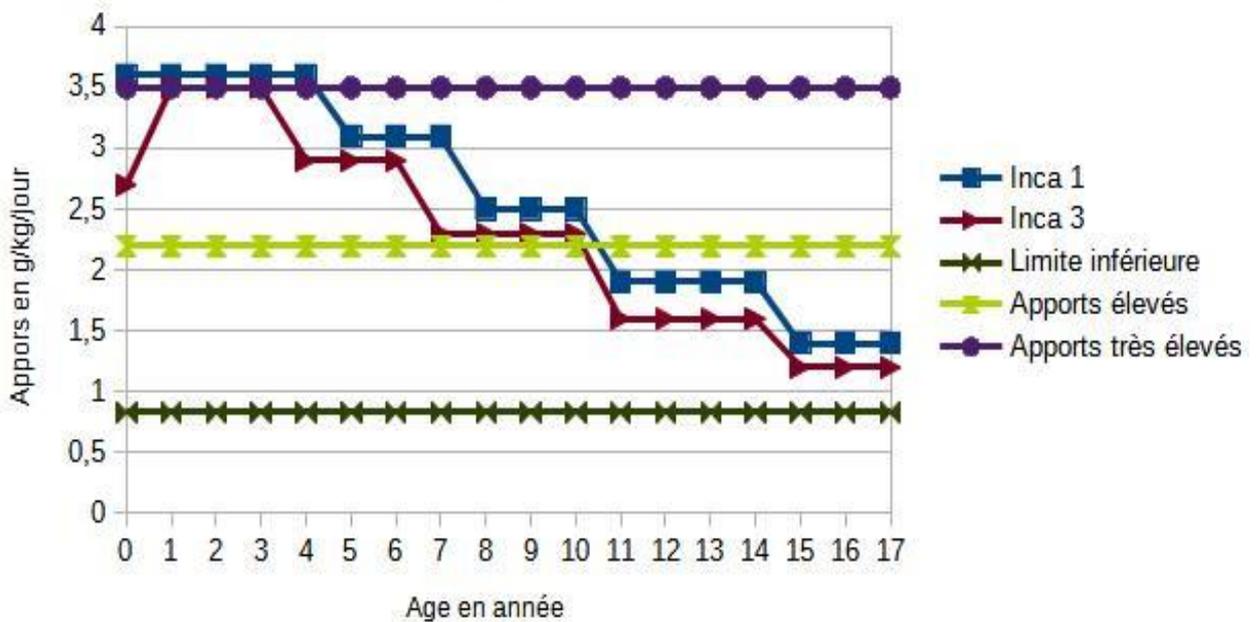
L'analyse des différentes études INCA retrouve une consommation en protéines des enfants très proche de la limite maximale que l'on s'exprime en g/kgpc/j (supérieur à 2 g/kgpc/j jusqu'à 10 ans) ou en % (supérieur à 15 %) des AESA. Au vu de ces valeurs, une carence en protéines semble hautement improbable.

³⁰ https://www.idealg.org/sites/default/files/digitalAssets/72/72069_N_35.pdf

Apport des protéines en pourcentage des AESA en fonction de l'âge



Apport des protéines en g/kg/jour en fonction de l'âge chez les enfants



Une alimentation dans l'enfance aussi riche en protéines peut poser certains problèmes. Cela conduit à un rebond d'adiposité plus précoce et à une augmentation du risque d'obésité à l'âge adulte (Rolland-Cachera, 1995 ; Rolland-Cachera, 2010 ; Rolland-Cachera, 2016). Ce phénomène semble accentué quand les apports protéiques sont principalement d'origine animale (Weijs, 2011 ; Jen et al., 2018 ; Arnesen, 2022). Ainsi végétaliser l'alimentation des enfants permet de limiter les risques d'obésité à l'âge adulte, mais également de diminuer le risque cardio-vasculaire (Kaikkonen et al., 2014 ; Carlson et al., 2011 ; Desmond et al., 2018 ; Wall et al., 2018). Ainsi, les études et les recommandations viennent appuyer le fait qu'il est important pour les enfants d'avoir une alimentation plus riche en fruits et légumes avec un apport en protéines animales limité (Buscail, 2018 ; HCSP 2020). En pratique, tant que le besoin énergétique est satisfait, l'apport protéique est lui aussi satisfait. En effet, les besoins énergétiques des enfants sont tellement importants qu'il semble impossible qu'il puisse exister une carence en protéines, sauf situation très particulière et aberrante (alimentation très peu diversifiée) (Mariotti et Gardner., 2019). De ce fait, il n'est pas nécessaire de rechercher des associations alimentaires spécifiques pour couvrir les besoins protéiques (Anses, 2020).

Des études ont montré que le développement des enfants végétariens et végétaliens était conforme tant au niveau staturo-pondéral (avec un rebond d'adiposité retardé) qu'au niveau psycho-moteur. L'important étant d'être correctement suivi et conseillé pour l'ensemble des aspects nutritionnels : l'apport obligatoire en vitamine B₁₂ par exemple (Melina, 2016 ; Lahmer 2018 ; Weder 2019).

En conclusion, les enfants ont plutôt un risque d'avoir trop de protéines dans leur alimentation, notamment apportées par les POA au détriment de la consommation en fruits et légumes. Les études montrent qu'une végétalisation des apports en protéines peut permettre une meilleure santé à l'âge adulte. Par ailleurs, les protéines végétales permettent une croissance harmonieuse.

5.2.2. Sportifs et sportives

La viande a longtemps été considérée comme indispensable à un travail de force. Cependant, il est établi que la prise de masse musculaire ne dépend pas de l'origine des protéines, mais bien de leur quantité et de l'apport en calories qui les accompagnent. Une alimentation végétalienne peut tout à fait permettre aux sportifs et aux sportives de satisfaire leurs besoins nutritionnels et parfois mieux que ne le ferait une alimentation omnivore (Nebl J, 2019a). De plus, l'adoption d'un régime végétarien, et en particulier végétalien, est associée à un bon état de santé et constitue donc une alternative parfaitement adaptée pour les coureurs et coureuses d'endurance (Wirnitzer K, 2016). Une étude avec un petit effectif de 19 végétaliens et 19 consommateurs de POA pour qui les apports en protéines ont été augmentés à 1,6

g/kgpc/j (avec des compléments) conclut à une prise musculaire identique s'ils sont soumis au même entraînement (Hevia-Larraín, 2021). À titre indicatif, les besoins d'un athlète d'endurance de 73 kg peuvent être estimés à 3600 kcal par jour et de 120 g de protéines, celle d'un athlète de force de 98 kg les apports caloriques seraient de 4800 kcal et de 160 g de protéine par jour (Swiss Society for Nutrition). Par ailleurs, au-delà de 2 g/kgpc/j la consommation protéique pourrait même devenir délétère pour l'organisme (Fuhrman, 2010).

L'étude NURMI (Nutrition and Running High Mileage) (Wirnitzer K, 2016) réalisée en 2015 permet de répondre également à certaines questions. Les résultats de cette étude montrent que la qualité de vie des coureurs d'endurance est élevée, quel que soit le régime alimentaire. Ces résultats soutiennent l'idée que l'adhésion à un régime végétarien ou végétalien peut être une alternative appropriée pour les sportifs et les sportives d'endurance (Balestrino, 2019). Au niveau des performances sportives, une étude réalisée chez des athlètes de haut niveau indique que les capacités cardiorespiratoires et l'endurance des végétariens et des végétariennes sont supérieures à celles de leurs homologues omnivores. La force musculaire maximale ne diffère pas selon le régime. Cela suggère que les régimes végétariens ne compromettent pas les résultats des performances et peuvent faciliter la capacité aérobie des athlètes (Lynch, 2016). D'autres études ont montré qu'un régime à base de plantes peut permettre d'améliorer les performances et d'accélérer la récupération dans les sports d'endurance. Par ailleurs, sachant que les athlètes d'endurance sont davantage à risque de maladies cardio-vasculaires, un régime à base de plantes pourrait permettre de prévenir ces troubles (Barnard, 2019). Les coureurs et coureuses plus occasionnels peuvent également suivre un régime végétalien (Nebl, 2019b). Une alimentation sans POA ne semble pas être préjudiciable à l'endurance et à la force musculaire. Une étude menée chez deux groupes de jeunes femmes comparables au niveau de l'activité physique et de l'IMC, a montré que les végétaliennes avaient une VO₂ max ($44,5 \pm 5,2$ ml/kg/min) et un temps d'endurance sous-maximal jusqu'à épuisement ($12,2 \pm 5,7$ min) significativement plus élevés que les performances enregistrées chez les omnivores ($41,6 \pm 4,6$ ml/kg/min et $8,8 \pm 3,0$ min, respectivement) (Boutros, 2020).

S'il apparaît bénéfique pour une bonne accommodation de l'organisme à l'effort d'avoir une alimentation équilibrée et correctement supplémentée en vitamine B₁₂ pour les végétalien·nes, le niveau de preuve concernant les bénéfiques potentiels d'une complémentation en acides aminés demeure modeste (Rogerson, 2017). Il semble que les athlètes végétarien·nes sont susceptibles de bénéficier d'une supplémentation en créatine (Kaviani, 2020). En outre, des essais randomisés et contrôlés par placebo montrent que la supplémentation en créatine est sûre jusqu'à 20 g/j, avec une réserve possible uniquement chez les personnes atteintes d'une maladie rénale. Parmi les acides aminés il semblerait que seule une supplémentation en β -alanine ait montré une utilité chez les athlètes de manière générale (Goron, 2018).

Ainsi, les protéines végétales peuvent fournir l'ensemble des éléments nécessaires pour une activité sportive, même à haut niveau. Une supplémentation en β -alanine et en créatine ne semble pas indispensable, mais peut être bénéfique. Une alimentation végétale, en plus de permettre des performances similaires, voire supérieures à un régime traditionnel, permettrait une meilleure santé et donc plus de régularité d'entraînement et un meilleur état cardio-vasculaire.

5.2.3. Sujet âgé

La sarcopénie du sujet âgé³¹ peut compromettre sa mobilité et son autonomie. Il est donc important d'en comprendre les mécanismes et d'élaborer des réponses adaptées. Il existe des éléments convergents qui suggèrent que les besoins en protéines seraient plus élevés : autour de 1 g/kgpc/j. Dans ce contexte, en l'absence d'études comparables à celles réalisées chez le jeune adulte, il n'est pas possible de connaître les besoins spécifiques en acides aminés indispensables des personnes âgées (Young and Tharakan, 2004).

Le renouvellement protéique diminue avec l'âge puisqu'il est de : 17,4 g/kgpc/j chez le nourrisson, 6,9 g/kgpc/j chez le jeune enfant, 3,0 g/kgpc/j chez l'adulte, et 1,9 g/kgpc/j chez le sujet âgé (AFSSA, 2007). Il n'existe pas de différence détectable entre les hommes âgés et les plus jeunes concernant la synthèse protéique pendant les périodes de jeûne. En revanche, on observe une diminution de la réponse de la synthèse protéique après l'ingestion d'acides aminés indispensables. Les effets anti-cataboliques en réponse à l'insuline sont également diminués (Guillet et al., 2004a). Cependant les interventions visant à obtenir une réponse anabolisante aux protéines restent controversées. Certaines études montrent un effet, d'autres non (Mitchell et al., 2016). Par ailleurs, le métabolisme splanchnique peut être modifié et conduire à une absorption plus importante par le tissu lors du 1^{er} passage. Cependant le rôle de cette extraction splanchnique n'est pas connu. Les acides aminés ainsi prélevés participent-ils à la protéosynthèse ou sont-ils oxydés, et dans quel but ? Il apparaît que les personnes âgées ont davantage de difficultés à tirer un bénéfice d'une grande dose d'acides aminés. Plusieurs facteurs sont évoqués : la qualité de la synthèse protéique qui diminue, la moindre importance de la masse musculaire, l'effet anti-catabolique de l'insuline diminué et un taux d'hydroxylation de phénylalanine plus lent. L'insuline joue aussi un rôle dans la perfusion microvasculaire périphérique. Une meilleure perfusion pourrait contribuer à une meilleure réponse de synthèse protéique. La digestion de protéines dites rapides n'est pas une condition préalable à une réponse post-prandiale maximale. Il apparaît plus probable que cela dépend des différences de composition des sources d'acides aminés indispensables

³¹ La borne à partir de laquelle un sujet est âgé est variable d'un organisme à l'autre, d'un individu à l'autre. La borne définie par Anses est de 50 ans pour les femmes et 60 ans pour les hommes (Anses, 2021).

(Wilkinson et al. 2016). Il est également souhaitable de tenir compte de la modification du microbiote intestinal (Watson, 2021).

Les études menées sur les personnes âgées végétariennes et végétaliennes rapportent des apports en protéines parfois plus faibles mais pas toujours (Schmidt et al., 2016). Certaines études constatent que les apports en protéines sont comparables quel que soit le degré d'exclusion des produits animaux (Rizzo et al., 2013). En général, les études sur les végétariens âgés sont cohérentes avec celles sur les végétariens plus jeunes.

Il a été indiqué plus haut le rôle de l'insuline dans la synthèse des protéines. L'insulino-résistance augmente avec l'âge. Les voies de signalisation de l'insuline sont alors affectées (Capeau, 2003) et par là-même la synthèse protéique. Il pourrait être utile d'équilibrer les apports en protéines sur les trois repas (les petits-déjeuners sont souvent pauvres en protéines) et de proposer une activité physique avant chaque repas riche en protéines (Gougeon, 2013). Si l'apport en protéines est un facteur important, il apparaît que maintenir une activité physique est encore plus prépondérant dans le maintien d'un volume de masse maigre satisfaisant (Xu et al., 2020). Les régimes à base de plantes et notamment végétaliens ont montré une amélioration de la sensibilité à l'insuline indépendamment de la masse corporelle des sujets, et cela en quelques semaines avec un phénomène dose-dépendant (plus l'alimentation est végétalisée, moins il y a d'insulino-résistance (Chen Z. al., 2018, Adeva-Andany et al., 2019, Cui X, et al. 2019). Les hommes de plus de 70 ans non-diabétiques et non dialysés, mais avec une insuffisance rénale stade 3-5³², qui ont adhéré à une alimentation majoritairement végétale ont une meilleure sensibilité à l'insuline (Gonzalez-Ortiz, 2020).

Une étude menée sur 3795 Chinois-es dont 112 (3 %) étaient à la fois obèses et sarcopéniques a montré une association significative inverse, (odd ratio de 0,79 [0,65-0,97]), avec l'adoption d'une alimentation végétarienne. Cette étude suggère donc qu'une alimentation végétarienne est bénéfique pour prévenir ou ralentir l'apparition d'une obésité sarcopénique chez les personnes âgées (Chen F., 2021).

Les participant-es agé-es des études ATTICA et MEDIS ont été classés selon leur consommation de protéines et l'origine animale ou végétale de celles-ci. Ces données ont ensuite été associées à un vieillissement réussi selon le Successful Aging Index (SAI) qui repose sur dix caractéristiques liées à la santé (sociales, mode de vie et cliniques). Ainsi les participant-es ayant une consommation de protéines de type « faible en protéines animales et forte en protéines végétales » et « forte en protéines animales et forte en protéines végétales » avaient un score SAI supérieur de 6 et 7 %, respectivement, à celui des autres participant-es qui ont une consommation de protéines de type « faible en protéines animales et végétales » et « forte en protéines animales et faible en protéines végétales ». Le ratio de consommation de protéines en faveur des protéines végétales semble également bénéfique pour les

³² Insuffisance rénale chronique modérée à terminale.

personnes de plus de 50 ans à la fois quant à leur santé individuelle et pour un bon vieillissement ([Foscolou, 2020](#)).

En conclusion, la végétalisation des apports en protéines ne semble pas causer une sarcopénie, mais serait plutôt bénéfique pour lutter contre ce phénomène important dans la qualité de vie des personnes âgées.

6. Conclusion

Au fur et à mesure que nos connaissances avancent, la biodisponibilité des protéines végétales apparaît très proche voire, dans certains cas, équivalente à celle des protéines animales. Force est de constater que « dans les pays occidentaux, la vision standard de la qualité des protéines est maintenant obsolète » ([Mariotti, 2017](#)). Les différentes études alimentaires nous indiquent des quantités de protéines ingérées suffisamment importantes pour satisfaire nos besoins, quelle que soit notre alimentation. Le critère de la biodisponibilité ne permet pas de justifier la préférence encore trop souvent accordée aux protéines animales. Les végétaux, dans une alimentation suffisamment diversifiée comprenant des céréales complètes, des légumineuses et des fruits à coque, fournissent tous les acides aminés en quantité suffisante et cela quel que soit l'âge de la vie ou le niveau d'activité physique. De plus, si nous regardons de manière plus globale notre alimentation, une protéine de qualité devrait être à la fois bonne pour la santé et pour l'environnement. Dans ce contexte, les protéines végétales pourraient être considérées comme étant, en moyenne, de qualité supérieure à leurs homologues animaux ([Katz, 2019](#)). Ces aspects sont développés dans d'autres avis de l'ONAV.

Références

Adeva-Andany MM, González-Lucán M, Fernández-Fernández C, Carneiro-Freire N, Seco-Filgueira M, Pedre-Piñeiro AM. Effect of diet composition on insulin sensitivity in humans. *Clin Nutr ESPEN*. 2019 Oct;33:29-38. doi: 10.1016/j.clnesp.2019.05.014. Epub 2019 Jun 6. PMID: 31451269.

Adibi SA, Morse EL, Masilamani SS, Amin PM. Evidence for two different modes of tripeptide disappearance in human intestine: uptake by peptide carrier systems and hydrolysis by peptide hydrolases. *J Clin Invest* 1975;56:1355–63

AFSSA. Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations. 2007.

Alberts et al. L'essentiel de la biologie cellulaire. Introduction à la biologie moléculaire de la cellule. 1998. Ed Flammarion.

Allès B., Baudry J., Méjean C., Touvier M., Péneau S., Hercberg S, Kesse-Guyot E. Comparison of Sociodemographic and Nutritional Characteristics between Self-Reported Vegetarians, Vegans, and Meat-Eaters from the NutriNet-Santé Study. *Nutrients*. 2017, 9, 1023 ; doi :10.3390/nu9091023.

Anses, AVIS relatif au risque d'excès d'apport en iode lié à la consommation d'algues dans les denrées alimentaires. Maisons-Alfort, le 25 juin 2018. <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2017SA0086.pdf>

Anses, Protéines <https://www.anses.fr/fr/content/les-prot%C3%A9ines>

Anses. Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles : Avis de l'Anses - Rapport d'expertise collective. (2017).

Anses. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'actualisation des repères alimentaires du PNNS pour les enfants de 4 à 17 ans. 41p. (2019).

Anses 2019b. AVIS de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif à l'actualisation des repères alimentaires du PNNS pour les femmes enceintes ou allaitantes. 53p. <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2017SA0141.pdf> (2019).

Anses 2020. Appui scientifique et technique de l'Anses. Demande n°2019-SA-0205. NOTE d'appui scientifique et technique de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail relatif aux recommandations nutritionnelles pour la mise en place d'une expérimentation en milieu scolaire de menus végétariens. Janvier 2020.

Arnesen EK, Thorisdottir B, Lamberg-Allardt C, Bärebring L, Nwaru B, Dierkes J, Ramel A, Åkesson A. Protein intake in children and growth and risk of overweight or obesity: A systematic review and meta-analysis. *Food Nutr Res.* 2022 Feb 21;66. doi: 10.29219/fnr.v66.8242. PMID: 35261578; PMCID: PMC8861858.

Balestrino M, Adriano E. Beyond sports: Efficacy and safety of creatine supplementation in pathological or parapsychological conditions of brain and muscle. *Med Res Rev.* 2019;1–33. DOI: 10.1002/med.21590

Barnard ND, David M. Goldman, James F. Loomis, Hana Kahleova, Susan M. Levin, Stephen Neabore and Travis C. Batts. Plant-Based Diets for Cardiovascular Safety and Performance in Endurance Sports *Nutrients* 2019, 11, 130; doi:10.3390/nu11010130

Blachier F, Boutry C, Bos C, Tomé D. Metabolism and functions of L-glutamate in the epithelial cells of the small and large intestines. *Am J Clin Nutr.* 2009 Sep;90(3):814S-821S. doi: 10.3945/ajcn.2009.27462S. Epub 2009 Jul 1. PMID: 19571215.

Bohe, J., Low, A., Wolfe, R. R. and Rennie, M. J. (2003) Human muscle protein synthesis is modulated by extracellular, not intramuscular amino acid availability: a dose-response study. *J Physiol*, 552, pp. 315-24.

Boirie Y, Dangin M, Gachon P, et al. Slow and fast dietary proteins differently modulate postprandial protein accretion. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 1997, 94(26):14930-14935.

Bos, C., Stoll, B., Fouillet, H., Gaudichon, C., et al. (2003) Intestinal lysine metabolism is driven by the enteral availability of dietary lysine in piglets fed a bolus meal. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 285, pp. E1246-57.

Bos C, Stoll B, Fouillet H, Gaudichon C, Guan X, Grusak MA, Reeds PJ, Burrin DG, Tomé D. Postprandial intestinal and whole body nitrogen kinetics and distribution in piglets fed a single meal. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2005 Feb;288(2):E436-46. doi: 10.1152/ajpendo.00263.2004. Epub 2004 Oct 26. PMID: 15507535.

Boutros GH, Landry-Duval MA, Garzon M, Karelis AD. Is a vegan diet detrimental to endurance and muscle strength? *Eur J Clin Nutr.* 2020 Apr 24. doi: 10.1038/s41430-020-0639-y

Boye, J, Wijesinha-Bettoni, R and Burlingame, B 2012. Protein quality evaluation twenty years after the introduction of the protein digestibility corrected amino acid score method. *British Journal of Nutrition* 108, S183–S211

Bradbury KE, Tong TYN, Key TJ. Dietary Intake of High-Protein Foods and Other Major Foods in Meat-Eaters, Poultry-Eaters, Fish-Eaters, Vegetarians, and Vegans in UK Biobank. *Nutrients.* 2017 Dec 2;9(12):1317. doi: 10.3390/nu9121317. PMID: 29207491; PMCID: PMC5748767.

Bressani R, de Martell EC, de Godínez CM. Protein quality evaluation of amaranth in adult humans. *Plant Foods Hum Nutr.* 1993 Mar;43(2):123-43. doi: 10.1007/BF01087917. PMID: 8475000.

Buscail, C., Margat, A., Petit, S. *et al.* Fruits and vegetables at home (FLAM): a randomized controlled trial of the impact of fruits and vegetables vouchers in children from low-income families in an urban district of France. *BMC Public Health* 18, 1065 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5908-5>

Capeau J., Voies de signalisation de l'insuline : mécanismes affectés dans l'insulino-résistance. *Med Sci (Paris).* 2003 August; 19(8-9) : 834-839. doi:10,1051/medsci/20031989834

Carlson JJ, Eisenmann JC, Norman GJ, Ortiz KA, Young PC. Dietary fiber and nutrient density are inversely associated with the metabolic syndrome in US adolescents. *J Am Diet Assoc.* 2011 Nov;111(11):1688-95. doi: 10.1016/j.jada.2011.08.008.

Chauveau P, et al. La charge acide d'origine alimentaire : une nouvelle cible pour le néphrologue ? *Néphrol ther* (2017), <https://doi.org/10.1016/j.nephro.2017.10.003>

Chen F, Xu S, Cao L, Wang Y, Chen F, Tian H, Hu J, Wang Z, Wang D. A lacto-ovo-vegetarian dietary pattern is protective against sarcopenic obesity: A cross-sectional study of elderly Chinese people. *Nutrition.* 2021 Jun 7;91-92:111386. doi: 10.1016/j.nut.2021.111386. Epub ahead of print. PMID: 34293713.

Chen Z. Zuurmond MG, Van der Schaft N, NanoJ, Wijnhoven HAG, Ikram MA, Franco OH, Voortman T. Plant versus animal based diets and insulin resistance, prediabetes and type 2 diabetes : The Rotterdam Study. *Eur J. Epidemiol.* 2018 Sep ; 33(9):883-893.

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.* 6 (2014) 1318–1332.

Craddock JC, Genoni A, Strutt EF, Goldman DM. Limitations with the Digestible Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) with Special Attention to Plant-Based Diets: a Review. *Curr Nutr Rep.* 2021 Mar;10(1):93-98. doi: 10.1007/s13668-020-00348-8. Epub 2021 Jan 6. PMID: 33409931.

Cui X, Wang B, Wu Y, Xie L, Xun P, Tang Q, Cai W, Shen X. Vegetarians have a lower fasting insulin level and higher insulin sensitivity than matched omnivores: A cross-sectional study. *Nutr Metab Cardiovasc Dis.* 2019 May;29(5):467-473. doi: 10.1016/j.numecd.2019.01.012. Epub 2019 Feb 2. PMID: 30956029.

Dangin, M., Boirie, Y., Guillet, C. and Beaufrere, B. (2002) Influence of the protein digestion rate on protein turnover in young and elderly subjects. *J Nutr*, 132, pp. 3228S-33S.

Dangin, M., Guillet, C., Garcia-Rodenas, C., Gachon, P., et al. (2003) The rate of protein digestion affects protein gain differently during aging in humans. *J Physiol*, 549, pp. 635-44.

Dardevet, D., Sornet, C., Balage, M. and Grizard, J. (2000) Stimulation of in vitro rat muscle protein synthesis by leucine decreases with age. *J Nutr*, 130, pp. 2630-5.

Darmaun D, Déchelotte P. Role of leucine as a precursor of glutamine alpha-amino nitrogen in vivo in humans. *Am J Physiol*. 1991 Feb;260(2 Pt 1):E326-9. doi: 10.1152/ajpendo.1991.260.2.E326. PMID: 1996635.

Darmaun D. Role of the small intestine in glutamine metabolism. *Clin Nutr*. 1993 Feb;12(1):50-1. doi: 10.1016/0261-5614(93)90147-v. PMID: 16843278.

Delimaris I. Adverse effects associated with protein intake above the recommended dietary allowance for adults. *ISRN Nutr*. 2013;2013:126929

Demange S. La relation médecin-patient au regard du végétarisme. Saint Etienne; 2017.

Darragh AJ, Hodgkinson SM. Quantifying the digestibility of dietary protein. *J Nutr*. 2000 Jul;130(7):1850S-6S. doi: 10.1093/jn/130.7.1850S. PMID: 10867062.

Desmond MA, Sobiecki J, Fewtrell M, Wells JCK. Plant-based diets for children as a means of improving adult cardiometabolic health. *Nutr Rev*. 2018 Apr 1;76(4):260-273. doi: 10.1093/nutrit/nux079.

Dietrich S, Trefflich I, Ueland PM, Menzel J, Penczynski KJ, Abraham K, Weikert C. Amino acid intake and plasma concentrations and their interplay with gut microbiota in vegans and omnivores in Germany. *Eur J Nutr*. 2022 Jan 16. doi: 10.1007/s00394-021-02790-y. Epub ahead of print. PMID: 35034170.

Egana JI et al. Sweet lupin protein quality in young men. *Journal of Nutrition*, 1992, 122:2341–2347.

Erbersdobler, Helmut & Barth, Christian & Jahreis, Gerhard. (2017). Legumes in human nutrition Nutrient content and protein quality of pulses. *Ernährungs Umschau*. 64. 134 - 139. 10.4455/eu.2017.034.

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. (2007). Protein and amino

acid requirements in human nutrition: report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43411>

Foscolou A, Critselis E, Tyrovolas S, Chrysohoou C, Naumovski N, Sidossis LS, Rallidis L, Matalas AL, Panagiotakos D. The association of animal and plant protein with successful ageing: a combined analysis of MEDIS and ATTICA epidemiological studies. *Public Health Nutr.* 2020 May 21;1-10. doi: 10.1017/S1368980020000427. Epub ahead of print. PMID: 32434609.

Fouillet, H., Bos, C., Gaudichon, C. and Tome, D. (2002) Approaches to quantifying protein metabolism in response to nutrient ingestion. *J Nutr*, 132, pp. 320S-18S.

FUHRMAN, J. and D.M. FERRERI. Fueling the vegetarian (vegan) athlete. *Curr. Sports Med. Rep.*, Vol. 9, No. 4, pp. 233Y241, 2010

Gaudichon C, Bos C, Morens C, Petzke KJ, Mariotti F, Everwand J, Benamouzig R, Daré S, Tomé D, Metges CC. Ileal losses of nitrogen and amino acids in humans and their importance to the assessment of amino acid requirements. *Gastroenterology.* 2002 Jul;123(1):50-9. doi: 10.1053/gast.2002.34233. PMID: 12105833.

Gausserès N, Mahè S, Benamouzig R, Luengo C, Drouet H, Rautureau J, Tomé D. The gastro-ileal digestion of 15N-labelled pea nitrogen in adult humans. *Br J Nutr.* 1996 Jul;76(1):75-85. doi: 10.1079/bjn19960010. PMID: 8774218.

Gausserès N, Mahé S, Benamouzig R, Luengo C, Ferriere F, Rautureau J, Tomé D. [15N]-labeled pea flour protein nitrogen exhibits good ileal digestibility and postprandial retention in humans. *J Nutr.* 1997 Jun;127(6):1160-5. doi: 10.1093/jn/127.6.1160. PMID: 9187631.

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

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

Gilani GS. Background on international activities on protein quality assessment of foods. *Br J Nutr.* 2012 Aug;108 Suppl 2:S168-82. doi: 10.1017/S0007114512002383. PMID: 23107528.

Marian Glick-Bauer, Ming-Chin Yeh, The health advantage of a vegan diet: exploring the gut microbiota connection. *Nutrients* 2014, 6, 4822-4838.

González-Ortiz A, Xu H, Avesani CM, Lindholm B, Cederholm T, Risérus U, Ärnlöv J, Espinosa-Cuevas A, Carrero JJ. Plant-based diets, insulin sensitivity and inflammation in elderly men

with chronic kidney disease. *J Nephrol.* 2020 Oct;33(5):1091-1101. doi: 10.1007/s40620-020-00765-6. Epub 2020 Jun 8. PMID: 32514991; PMCID: PMC7557485.

Goron, A., Moinard, C. Amino acids and sport: a true love story?. *Amino Acids* 50, 969–980 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00726-018-2591-x>

Gougeon R. Insulin resistance of protein metabolism in type 2 diabetes and impact on dietary needs: a review. *Can J Diabetes.* 2013 Apr;37(2):115-20. doi: 10.1016/j.jcjd.2013.01.007. Epub 2013 Apr 23. PMID: 24070802.

Guénard H. *Physiologie humaine.* 2009. Ed Pradel. ISBN : 978-2-913996-76-2

Haddad EH, Sabaté J, Whitten CG. Vegetarian food guide pyramid: a conceptual framework. *Am J Clin Nutr.* 1999 Sep;70(3 Suppl):615S-619S. doi: 10.1093/ajcn/70.3.615s. PMID: 10479240.

Hankard RG, Haymond MW, Darmaun D. Effect of glutamine on leucine metabolism in humans. *Am J Physiol.* 1996 Oct;271(4 Pt 1):E748-54. doi: 10.1152/ajpendo.1996.271.4.E748. PMID: 8897864.

Haut Conseil de la Santé Publique. AVIS relatif à la révision des repères alimentaires pour les enfants âgés de 0-36 mois et de 3-17 ans. 30 juin 2020

Heidi M. Lynch, Christopher M. Wharton and Carol S. Johnston. Cardiorespiratory Fitness and Peak Torque Differences between Vegetarian and Omnivore Endurance Athletes: A Cross-Sectional Study. *Nutrients* 2016, 8, 726; doi:10.3390/nu8110726

Hevia-Larraín, V., Gualano, B., Longobardi, I. *et al.* High-Protein Plant-Based Diet Versus a Protein-Matched Omnivorous Diet to Support Resistance Training Adaptations: A Comparison Between Habitual Vegans and Omnivores. *Sports Med* 51, 1317–1330 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40279-021-01434-9>

Jackson, A. A. (1995) Salvage of urea-nitrogen and protein requirements. *Proc Nutr Soc*, 54, pp. 535-47.

Jen V, Braun KVE, Karagounis LG, Nguyen AN, Jaddoe VWV, Schoufour JD, Franco OH, Voortman T. Longitudinal association of dietary protein intake in infancy and adiposity throughout childhood. *Clin Nutr.* 2018 Jun 6. pii: S02615614(18)30198-5. doi: 10.1016/j.clnu.2018.05.013.

Juillet B, Saccomani MP, Bos C, Gaudichon C, Tomé D, Fouillet H. Conceptual, methodological and computational issues concerning the compartmental modeling of a complex biological system: Postprandial inter-organ metabolism of dietary nitrogen in humans. *Math Biosci.*

2006 Dec;204(2):282-309. doi: 10.1016/j.mbs.2006.05.002. Epub 2006 May 20. PMID: 16806287.

Kaikkonen JE, Mikkilä V, Raitakari OT. Role of childhood food patterns on adult cardiovascular disease risk. *Curr Atheroscler Rep*. 2014 Oct;16(10):443. doi: 10.1007/s11883-014-0443-z.

Katz D.L, Doughty K.N, Geagan K., Jenkins D.A, Gardner C.D. Perspective: The Public Health Case for Modernizing the Definition of Protein Quality. *Advances in Nutrition*, Volume 10, Issue 5, September 2019, Pages 755–764, <https://doi.org/10.1093/advances/nmz023>

Key TJ, Davey GK, Appleby PN. Health benefits of a vegetarian diet. *Proc Nutr Soc*. 1999 May;58(2):271-5. doi: 10.1017/s0029665199000373. PMID: 10466166.

Killer M, Wald J, Pieprzyk J, Marlovits TC, Löw C. Structural snapshots of human PepT1 and PepT2 reveal mechanistic insights into substrate and drug transport across epithelial membranes. *Sci Adv*. 2021 Nov 5;7(45):eabk3259. doi: 10.1126/sciadv.abk3259. Epub 2021 Nov 3. PMID: 34730990; PMCID: PMC8565842.

Kimball, S. R. and Jefferson, L. S. (2005) Role of amino acids in the translational control of protein synthesis in mammals. *Semin Cell Dev Biol*, 16, pp. 21-7.

LAHMER M. Thèse de médecine sous la direction du Dr Nathalie Burger. L'alimentation végétarienne et végétalienne chez les enfants de 6 mois à 6 ans. 2018. Université de Montpellier.

Laidlaw SA, Shultz TD, Cecchino JT, Kopple JD. Plasma and urine taurine levels in vegans. *Am J Clin Nutr*. 1988 Apr;47(4):660-3. doi: 10.1093/ajcn/47.4.660. PMID: 3354491.

Laidlaw SA, Grosvenor M, Kopple JD. The taurine content of common foodstuffs. *JPEN J Parenter Enteral Nutr*. 1990 Mar-Apr;14(2):183-8. doi: 10.1177/0148607190014002183. Erratum in: *JPEN J Parenter Enteral Nutr* 1990 Jul-Aug;14(4):380. PMID: 2352336.

Larsson CL, Klock KS, Astrøm AN, Haugejorden O, Johansson G. Food habits of young Swedish and Norwegian vegetarians and omnivores. *Public Health Nutr*. 2001 Oct;4(5):1005-14. doi: 10.1079/phn2001167. PMID: 11784414.

Lea, Emma & Worsley, Anthony. (2003). Benefits and barriers to the consumption of a vegetarian diet in Australia. *Appetite*. 6. 127-136.

Lin R, Liu W, Piao M, Zhu H. A review of the relationship between the gut microbiota and amino acid metabolism. *Amino Acids*. 2017 Dec;49(12):2083-2090. doi: 10.1007/s00726-017-2493-3. Epub 2017 Sep 20. PMID: 28932911.

Liu, Z., Jahn, L. A., Wei, L., Long, W., et al. (2002) Amino acids stimulate translation initiation and protein synthesis through an Akt-independent pathway in human skeletal muscle. *J Clin Endocrinol Metab*, 87, pp. 5553-8.

Luiking YC, Engelen MP, Soeters PB, Boirie Y, Deutz NE. Differential metabolic effects of casein and soy protein meals on skeletal muscle in healthy volunteers. *Clin Nutr* 2011;30:65–72.

Macknin M, Kong T, Weier A, Worley S, Tang AS, Alkhouri N, Golubic M. Plant-based, no-added-fat or American Heart Association diets: impact on cardiovascular risk in obese children with hypercholesterolemia and their parents. *J Pediatr*. 2015 Apr;166(4):953-9.e1-3. doi: 10.1016/j.jpeds.2014.12.058. Epub 2015 Feb 12.

McCormack SE, Shaham O, McCarthy MA, Deik AA, Wang TJ, Gerszten RE, Clish CB, Mootha VK, Grinspoon SK, Fleischman A. Circulating branched-chain amino acid concentrations are associated with obesity and future insulin resistance in children and adolescents. *Pediatr Obes*. 2013 Feb;8(1):52-61. doi: 10.1111/j.2047-6310.2012.00087.x. Epub 2012 Sep 7. PMID: 22961720; PMCID: PMC3519972.

Marchand C, *Le médecin et l'alimentation. Principes de nutrition et recommandations alimentaires en France (1887-1940)*, thèse de Sciences de l'Homme et de la société, 2014.

Mariotti F, Pueyo ME, Tomé D, Bérot S, Benamouzig R, Mahé S. The influence of the albumin fraction on the bioavailability and postprandial utilization of pea protein given selectively to humans. *J Nutr*. 2001 Jun;131(6):1706-13. doi: 10.1093/jn/131.6.1706. PMID: 11385057.

Mariotti F, Pueyo ME, Tomé D, Mahé S. The bioavailability and postprandial utilisation of sweet lupin (*Lupinus albus*)-flour protein is similar to that of purified soyabean protein in human subjects: a study using intrinsically ¹⁵N-labelled proteins. *Br J Nutr*. 2002 Apr;87(4):315-23. doi: 10.1079/BJNBJN2002526. PMID: 12064341.

Mariotti F. 35-plant protein, animal protein, and protein quality. In: Mariotti F., editor. *Vegetarian and Plant-Based Diets in Health and Disease Prevention*. Academic Press; Cambridge, CA, USA: 2017. pp. 621–642.

Mariotti, F.; Gardner, C.D. Dietary Protein and Amino Acids in Vegetarian Diets—A Review. *Nutrients* 2019, 11, 2661.

Matthews DE, Marano MA, Campbell RG. Splanchnic bed utilization of glutamine and glutamic acid in humans. *Am J Physiol*. 1993 Jun;264(6 Pt 1):E848-54. doi: 10.1152/ajpendo.1993.264.6.E848. PMID: 8101428.

Melina V, Craig W, Levin S. Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Vegetarian Diets. *J Acad Nutr Diet*. 2016 Dec;116(12):1970-1980. doi: 10.1016/j.jand.2016.09.025. PMID:

27886704. Traduction disponible ici : <https://www.vegetarisme.fr/wp-content/uploads/2017/02/Vegetarisme-Position-2016-AND-version-francaise-1.pdf>

Metges, C. C., El-Khoury, A. E., Henneman, L., Petzke, K. J., et al. (1999) Availability of intestinal microbial lysine for whole body lysine homeostasis in human subjects. *Am J Physiol*, 277, pp. E597-607.

Metges, C. C., El-Khoury, A. E., Selvaraj, A. B., Tsay, R. H., et al. (2000) Kinetics of L-[1-(13)C]leucine when ingested with free amino acids, unlabeled or intrinsically labeled casein. *Am J Physiol Endocrinol Metab*, 278, pp. E1000-9.

D. Joe Millward, Metabolic Demands for Amino Acids and the Human Dietary Requirement: Millward and Rivers (1988a) Revisited, *The Journal of Nutrition*, Volume 128, Numéro 12, décembre 1998, Pages 2563S–2576S, <https://doi.org/10.1093/jn/128.12.2563S>

Millward, D. J. and Rivers, J. P. (1988b) The nutritional role of indispensable amino acids and the metabolic basis for their requirements. *Eur J Clin Nutr*, 42, pp. 367-93.

Millward DJ. Macronutrient intakes as determinants of dietary protein and amino acid adequacy. *J Nutr*. 2004 Jun;134(6 Suppl):1588S-1596S. doi: 10.1093/jn/134.6.1588S. PMID: 15173435.

Millward, D. (2012). Identifying recommended dietary allowances for protein and amino acids: A critique of the 2007 WHO/FAO/UNU report. *British Journal of Nutrition*, 108(S2), S3-S21. doi:10.1017/S0007114512002450

Mitchell WK, Wilkinson DJ, Phillips BE, Lund JN, Smith K, Atherton PJ. Human Skeletal Muscle Protein Metabolism Responses to Amino Acid Nutrition. *Adv Nutr*. 2016;7(4):828S-38S. Published 2016 Jul 15. doi:10.3945/an.115.011650

Mojtaba Kaviani, Keely Shaw and Philip D. Chilibeck. Benefits of Creatine Supplementation for Vegetarians Compared to Omnivorous Athletes: A Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17, 3041; doi:10.3390/ijerph17093041

R.W. Morton, K.T. Murphy, S.R. McKellar, B.J. Schoenfeld, M. Henselmans, E. Helms, A.A. Aragon, M.C. Devries, L. Banfield, J.W. Krieger, A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults, *British Journal of Sports Medicine*. 52 (2018) 376–384.

Motil KJ, Bier DM, Matthews DE, Burke JF, Young VR. Whole body leucine and lysine metabolism studied with [1-13C]leucine and [alpha-15N]lysine: response in healthy young men given excess energy intake. *Metabolism*. 1981 Aug;30(8):783-91. doi: 10.1016/0026-0495(81)90024-x. PMID: 6790902.

Moughan PJ, Rutherford SM. Gut luminal endogenous protein: implications for the determination of ileal amino acid digestibility in humans. *Br J Nutr.* 2012;108(Suppl 2):S258-63.

Nebel J, Schuchardt JP, Wasserfurth P, et al. Characterization, dietary habits and nutritional intake of omnivorous, lacto-ovo vegetarian and vegan runners - a pilot study. *BMC Nutr.* 2019a ; 5:51. Published 2019 Dec 3. doi:10.1186/s40795-019-0313-8

Nebel J, Schuchardt JP, Ströhle A, Wasserfurth P, Haufe S, Eigendorf J, Tegtbur U, Hahn A. Micronutrient Status of Recreational Runners with Vegetarian or Non-Vegetarian Dietary Patterns. *Nutrients.* 2019b May 22;11(5):1146. doi: 10.3390/nu11051146. PMID: 31121930; PMCID: PMC6566694.

Newsome SD, Feeser KL, Bradley CJ, Wolf C, Takacs-Vesbach C, Fogel ML. Isotopic and genetic methods reveal the role of the gut microbiome in mammalian host essential amino acid metabolism. *Proc Biol Sci.* 2020 Mar 11;287(1922):20192995. doi: 10.1098/rspb.2019.2995. Epub 2020 Mar 4. PMID: 32126953; PMCID: PMC7126075.

Nicol, B. M. and Phillips, P. G. (1976) The utilization of dietary protein by Nigerian men. *Br J Nutr*, 36, pp. 337-51.

Nygren, J. and Nair, K. S. (2003) Differential regulation of protein dynamics in splanchnic and skeletal muscle beds by insulin and amino acids in healthy human subjects. *Diabetes*, 52, pp. 1377-85.

Patti, M. E., Brambilla, E., Luzi, L., Landaker, E. J., et al. (1998) Bidirectional modulation of insulin action by amino acids. *J Clin Invest*, 101, pp. 1519-29.

Petzke, K. J., Grigorov, J. G., Korkushko, O. V., Kovalenko, N. K., et al. (1998) Incorporation of urea nitrogen into fecal protein and plasma protein amino acids in elderly human volunteers after ingestion of lactic acid bacteria. *Z Ernährungswiss*, 37, pp. 368-75.

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>.

Prochazkova M, Budinska E, Kuzma M, Pelantova H, Hradecky J, Heczkova M, Daskova N, Bratova M, Modos I, Videnska P, Splichalova P, Sowah SA, Kralova M, Henikova M, Selinger E, Klima K, Chalupsky K, Sedlacek R, Landberg R, Kühn T, Gojda J, Cahova M. Vegan Diet Is Associated With Favorable Effects on the Metabolic Performance of Intestinal Microbiota: A Cross-Sectional Multi-Omics Study. *Front Nutr.* 2022 Jan 7;8:783302. doi: 10.3389/fnut.2021.783302. PMID: 35071294; PMCID: PMC8777108.

Prod'homme, M., Rieu, I., Balage, M., Dardevet, D., et al. (2004) Insulin and amino acids both strongly participate to the regulation of protein metabolism. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*, 7, pp. 71-7.

Pudlo NA, Pereira GV, Parnami J, Cid M, Markert S, Tingley JP, Unfried F, Ali A, Varghese NJ, Kim KS, Campbell A, Urs K, Xiao Y, Adams R, Martin D, Bolam DN, Becher D, Eloie-Fadrosh EA, Schmidt TM, Abbott DW, Schweder T, Hehemann JH, Martens EC. Diverse events have transferred genes for edible seaweed digestion from marine to human gut bacteria. *Cell Host Microbe*. 2022 Mar 9;30(3):314-328.e11. doi: 10.1016/j.chom.2022.02.001. Epub 2022 Mar 2. PMID: 35240043.

Raj T, Dileep U, Vaz M, Fuller MF, Kurpad AV. Intestinal microbial contribution to metabolic leucine input in adult men. *J Nutr*. 2008 Nov;138(11):2217-21. doi: 10.3945/jn.108.093021. PMID: 18936222.

Rana SK, Sanders TA. Taurine concentrations in the diet, plasma, urine and breast milk of vegans compared with omnivores. *Br J Nutr*. 1986 Jul;56(1):17-27. doi: 10.1079/bjn19860082. PMID: 3676193.

Rand WM, Pellett PL, Young VR. Meta-analysis of nitrogen balance studies for estimating protein requirements in healthy adults. *Am J Clin Nutr*. 2003 Jan;77(1):109-27. doi: 10.1093/ajcn/77.1.109. PMID: 12499330.

Reeds PJ, Burrin DG, Stoll B, Van Goudoever JB. Role of the gut in the amino acid economy of the host. *Nestle Nutr Workshop Ser Clin Perform Program* 2000;3:25-40.

Reeds, P. J., Burrin, D. G., Stoll, B., van der Schoor, S. R. D., et al. (2001) Influence of gut metabolism on amino acid nutrition. 62nd Minnesota Nutrition Conference. Bloomington (MN).

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 Nov 13;6(6):712-28. doi: 10.3945/an.115.009654. Print 2015 Nov.

Ridlon JM, Wolf PG, Gaskins HR. Taurocholic acid metabolism by gut microbes and colon cancer. *Gut Microbes*. 2016 May 3;7(3):201-15. doi: 10.1080/19490976.2016.1150414. Epub 2016 Mar 22. PMID: 27003186; PMCID: PMC4939921.

Rizzo NS, Jaceldo-Siegl K, Sabate J, Fraser GE. Nutrient profiles of vegetarian and nonvegetarian dietary patterns. *J Acad Nutr Diet*. 2013;113(12):1610-1619. doi:10.1016/j.jand.2013.06.349

Rogerson D., Vegan diets: practical advice for athletes and exercisers. *Journal of the International Society of Sports Nutrition* (2017) 14:36 DOI 10.1186/s12970-017-0192-9

Rolland-Cachera MF, Deheeger M, Akrouit M, Bellisle F. Influence of macronutrients on adiposity development: a follow up study of nutrition and growth from 10 months to 8 years of age. *Int J Obes Relat Metab Disord*. 1995 Aug;19(8):573-8. PMID: 7489029.

Rolland-Cachera MF, Deheeger M, Maillot M, Bellisle F. Early adiposity rebound: causes and consequences for obesity in children and adults. *Int J Obes (Lond)*. 2006 Dec;30 Suppl 4:S11-7. doi: 10.1038/sj.ijo.0803514. Erratum in: *Int J Obes (Lond)*. 2010 Jul;34(7):1230. PMID: 17133230.

Rolland-Cachera MF, Akrouit M, Péneau S. Nutrient Intakes in Early Life and Risk of Obesity. *Int J Environ Res Public Health*. 2016 Jun 6;13(6):564. doi: 10.3390/ijerph13060564. PMID: 27275827; PMCID: PMC4924021.

Rutherford SM. Use of the guanidination reaction for determining reactive lysine, bioavailable lysine and gut endogenous lysine. *Amino Acids*. 2015 Sep;47(9):1805-15. doi: 10.1007/s00726-015-2007-0. Epub 2015 Jun 3. PMID: 26036685.

Rutherford SM, Fanning AC, Miller BJ, Moughan PJ. Protein digestibility-corrected amino acid scores and digestible indispensable amino acid scores differentially describe protein quality in growing male rats. *J Nutr*. 2015 Feb;145(2):372-9. doi: 10.3945/jn.114.195438. Epub 2014 Nov 26. PMID: 25644361.

Salomé M, de Gavelle E, Dufour A, Dubuisson C, Volatier JL, Fouillet H, Huneau JF, Mariotti F. Plant-Protein Diversity Is Critical to Ensuring the Nutritional Adequacy of Diets When Replacing Animal With Plant Protein: Observed and Modeled Diets of French Adults (INCA3). *J Nutr*. 2020 Mar 1;150(3):536-545. doi: 10.1093/jn/nxz252. PMID: 31618433.

Schmidt, J., Rinaldi, S., Scalbert, A. *et al*. Plasma concentrations and intakes of amino acids in male meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans: a cross-sectional analysis in the EPIC-Oxford cohort. *Eur J Clin Nutr* 70, 306–312 (2016). <https://doi.org/10.1038/ejcn.2015.144>

Sobiecki JG, Appleby PN, Bradbury KE, Key TJ. High compliance with dietary recommendations in a cohort of meat eaters, fish eaters, vegetarians, and vegans: results from the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition-Oxford study. *Nutr Res*. 2016;36(5):464-477. doi:10.1016/j.nutres.2015.12.016

Spencer EA, Appleby PN, Davey GK, Key TJ. Diet and body mass index in 38000 EPIC-Oxford meat-eaters, fish-eaters, vegetarians and vegans. *Int J Obes Relat Metab Disord*. 2003 Jun;27(6):728-34. doi: 10.1038/sj.ijo.0802300. PMID: 12833118.

Tang JE, Moore DR, Kujbida GW, Tarnopolsky MA, Phillips SM. Ingestion of whey hydrolysate, casein, or soy protein isolate: effects on mixed muscle protein synthesis at rest and following resistance exercise in young men. *J Appl Physiol* 2009;107:987–92.

Tappaz ML. Taurine biosynthetic enzymes and taurine transporter: molecular identification and regulations. *Neurochem Res.* 2004 Jan;29(1):83-96. doi: 10.1023/b:nere.0000010436.44223.f8. PMID: 14992266.

Tharrey M, Mariotti F, Mashchak A, Barbillon P, Delattre M, Fraser GE. Patterns of plant and animal protein intake are strongly associated with cardiovascular mortality: the Adventist Health Study-2 cohort. *Int J Epidemiol.* 2018 Oct 1;47(5):1603-1612. doi: 10.1093/ije/dyy030. PMID: 29618018; PMCID: PMC6658814.

Tharrey M, Mariotti F, Mashchak A, Barbillon P, Delattre M, Huneau JF, Fraser GE. Patterns of amino acids intake are strongly associated with cardiovascular mortality, independently of the sources of protein. *Int J Epidemiol.* 2019 Sep 27. pii: dyz194. doi: 10.1093/ije/dyz194.

Tomé, D., 2013. Digestibility issues of vegetable versus animal proteins: protein and amino acid requirements - functional aspects. *Food Nutr. Bull.* 34, 272–274.

Veronique Sante-Lhoutellier, Thierry Astruc, Jean-Dominique Daudin, Alain Kondjoyan, Valérie Scislowski, et al.. Digestion des protéines des viandes en fonction de la cuisson. Influence de la température de cuisson sur la digestion des protéines des viandes : approches in vitro et in vivo. *Viandes et Produits Carnés*, 2017, 33. (hal-02907301)

Stine Weder, Morwenna Ho_mann, Katja Becker, Ute Alexy and Markus Keller Energy, Macronutrient Intake, and Anthropometrics of Vegetarian, Vegan, and Omnivorous Children (1–3 Years) in Germany (VeChi Diet Study) *Nutrients* 2019, 11, 832; doi:10.3390/nu11040832

Tessari P, Garibotto G. Interorgan amino acid exchange. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* 2000 Jan;3(1):51-7. doi: 10.1097/00075197-200001000-00009. PMID: 10642084.

Torrallardona D, Harris CI, Coates ME, Fuller MF. 1996. Microbial amino acid synthesis and utilization in rats: incorporation of ¹⁵N from ¹⁵NH₄Cl into lysine in the tissues of germ-free and conventional rats. *Br. J. Nutr.* 76, 689–700. (10.1079/BJN19960076)

Watson MD, Cross BL, Grosicki GJ. Evidence for the Contribution of Gut Microbiota to Age-Related Anabolic Resistance. *Nutrients.* 2021 Feb 23;13(2):706. doi: 10.3390/nu13020706. PMID: 33672207; PMCID: PMC7926629.

Wilkinson DJ, Hossain T, Hill DS, Phillips BE, Crossland H, Williams J, Loughna P, Churchward-Venne TA, Breen L, Phillips SM, et al. . Effects of leucine and its metabolite beta-hydroxy-beta-methylbutyrate on human skeletal muscle protein metabolism. *J Physiol* 2013;591:2911–23.

Wirnitzer K, Seyfart T, Leitzmann C, et al. Prevalence in running events and running performance of endurance runners following a vegetarian or vegan diet compared to non-vegetarian endurance runners: the NURMI Study. Springerplus. 2016;5:458. Published 2016 Apr 14. doi:10.1186/s40064-016-2126-4

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.

Xu F, Earp JE, Vadiveloo M, et al. The Relationships between Total Protein Intake, Protein Sources, Physical Activity, and Lean Mass in a Representative Sample of the US Adults. *Nutrients*. 2020;12(10):3151. Published 2020 Oct 15. doi:10.3390/nu12103151

Young VR, Fajardo L, Murray E, Rand WM, Scrimshaw NS. Protein requirements of man: comparative nitrogen balance response within the submaintenance-to-maintenance range of intakes of wheat and beef proteins. *J Nutr*. 1975 May;105(5):534-42. doi: 10.1093/jn/105.5.534. PMID: 1168697.

Young VR, Puig M, Queiroz E, Scrimshaw NS, Rand WM. Evaluation of the protein quality of an isolated soy protein in young men: relative nitrogen requirements and effect of methionine supplementation. *Am J Clin Nutr*. 1984a Jan;39(1):16-24. doi: 10.1093/ajcn/39.1.16. PMID: 6537870.

Young VR, Wayler A, Garza C, Steinke FH, Murray E, Rand WM, Scrimshaw NS. A long-term metabolic balance study in young men to assess the nutritional quality of an isolated soy protein and beef proteins. *Am J Clin Nutr*. 1984b Jan;39(1):8-15. doi: 10.1093/ajcn/39.1.8. PMID: 6537872.

Young, V. R. (1991) Soy protein in relation to human protein and amino acid nutrition. *J. Am. Diet. Assoc.*91:828–835.

V.R. Young, P.L. Pellett, Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition, *The American Journal of Clinical Nutrition*. 59 (1994) 1203S–1212S.

Wall CR, Stewart AW, Hancox RJ, Murphy R, Braithwaite I, Beasley R, Mitchell EA; ISAAC Phase Three Study Group. Association between Frequency of Consumption of Fruit, Vegetables, Nuts and Pulses and BMI: Analyses of the International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC). *Nutrients*. 2018 Mar 7;10(3):316. doi: 10.3390/nu10030316. PMID: 29518923; PMCID: PMC5872734.

Weijs PJ, Kool LM, van Baar NM, van der Zee SC. High beverage sugar as well as high animal protein intake at infancy may increase overweight risk at 8 years: a prospective longitudinal

pilot study. *Nutr J.* 2011 Sep 23;10:95. doi: 10.1186/1475-2891-10-95. PMID: 21943278; PMCID: PMC3189101.

Zezulka AY, Calloway DH. Nitrogen retention in men fed isolated soybean protein supplemented with L-methionine, D-methionine, N-acetyl-L-methionine, or inorganic sulfate. *J Nutr.* 1976 Sep;106(9):1286-91. doi: 10.1093/jn/106.9.1286. PMID: 986424.