

**Nutrition et santé : lipides et protéines d'origine végétale - De nouvelles données pour juger de la qualité des protéines végétales chez l'homme - Implications et perspectives**

**Nutrition and health: vegetal lipids and proteins - New data to appreciate the quality of vegetal proteins in humans - Implications and outlook**

Oléagineux, Corps Gras, Lipides. Volume 10, Numéro 1, 17-22, Janvier - Février 2003, Protéines et lipides végétaux : interactions nutritionnelles et fonctionnelles

**Auteur(s)** : François MARIOTTI, Daniel TOMÉ, UMR INRA/INAPG de Physiologie de la Nutrition et du Comportement Alimentaire, INAPG, 16 rue Claude Bernard, 75005 Paris.

**Author(s)** : François MARIOTTI, Daniel TOMÉ

**Résumé** : La qualité des protéines pour l'alimentation de l'homme est un sujet très ancien mais les différentes méthodes proposées jusqu'ici pour évaluer la qualité protéique ont été largement critiquées, pour des problèmes conceptuels et méthodologiques. Depuis quelques années des avancées ont pu être faites grâce à l'emploi d'isotopes stables dans la phase postprandiale chez l'homme. Ces techniques proposent des mesures fines et conceptuellement adaptées pour évaluer la qualité des protéines et explorer le concept de qualité protéique. Ces approches ont montré que les différences globales de qualités entre sources protéiques chez l'homme au bon statut nutritionnel sont bien plus faibles que cela n'était attendu. Parallèlement, la nature des protéines alimentaires pourrait avoir des effets métaboliques plus subtils, au niveau de certains tissus ou au niveau des voies métaboliques secondaires de certains acides aminés, dont il faudra mesurer l'étendue et évaluer les conséquences physiologiques et fonctionnelles.

**Summary** : Protein quality for human nutrition is an old issue but the various methods aiming to assess protein quality have been criticized on theoretical and methodological ground. For the last years, stable isotope tracer-based methods in the postprandial state in humans have produced important progress. These refined techniques are strongly theoretically sounded for assessing protein quality and gaining further insight on the underlying concept. These methods have shown that protein sources exhibit global differences in protein quality in humans with adequate nutritional status that are far lower than expected based on usual methods. However, the nature of the dietary proteins could have some more subtle impact on tissues or secondary individual amino acid metabolic pathways, the final physiological and functional consequences of which will need to be evaluated.

**Mots-clés** : Protéines végétales, protéines animales, qualité protéique, valeur nutritionnelle, digestibilité, valeur biologique, postprandial, isotopes stables, métabolisme des acides aminés, acides aminés soufrés, lysine, glutathion, arginine.

**Keywords** : Plant protein, animal protein, protein quality, nutritional value, digestibility, biological value, postprandial, stable isotopes, amino acids metabolism, sulfur amino acids, lysine, glutathione, arginine.

## ARTICLE

### De la difficulté d'évaluer la qualité protéique chez l'homme

Dès le début du siècle, il a été formulé que la qualité d'une protéine chez l'homme relevait de sa capacité à être retenue avec le maximum d'efficacité dans l'organisme [1]. On pense donc pouvoir juger de la qualité d'une protéine alimentaire chez l'homme en mesurant l'ampleur des pertes azotées induites par sa consommation, en essayant de les distinguer des pertes continues d'azote "endogène", provenant du catabolisme des protéines de l'organisme [1]. Pour ce faire, la mesure du bilan azoté à long terme obtenu par des individus consommant comme seule source protéique la protéine qu'on cherche à évaluer permet d'estimer la rétention de cette protéine (de l'azote) dans l'organisme, le plus souvent par comparaison au bilan obtenu avec une autre source protéique [2]. L'animal en croissance, caractérisé par un gain azoté, fournit tout naturellement un modèle d'étude pratique pour l'homme [3]. Ainsi l'essentiel des données concernant la qualité des protéines chez l'homme qui ont été obtenues jusque dans les années 90 repose sur la capacité relative d'une protéine à promouvoir un bilan azoté positif chez l'animal ou à assurer un bilan azoté nul chez l'homme.

Les nombreuses données obtenues chez le rat avec ce type d'approche consacrent alors l'ensemble des sources protéiques végétales comme étant de mauvaise qualité, par opposition aux sources protéiques animales [4, 5]. Les données chez l'homme, beaucoup plus rares, sont moins contrastées et indiquent que certaines sources végétales comme le soja sont en fait de qualité similaire aux sources animales [6, 7] mais indiquent par exemple une moindre qualité des protéines de céréales [2]. Pratiquement, les résultats d'évaluation de la qualité protéique diffèrent entre les différents modèles animaux ainsi qu'entre l'homme et les animaux [8]. La qualité protéique se décompose en deux paramètres : la digestibilité de la protéine, qui donne un indice de la biodisponibilité des acides aminés, et la valeur biologique qui reflète l'efficacité d'utilisation de ces acides aminés absorbés [9, 10].

Parallèlement, les progrès conceptuels amènent à définir la qualité d'une protéine comme son aptitude à couvrir les besoins en azote et en acides aminés [11, 12]. L'accent est mis sur l'importance critique du besoin en acides aminés indispensables pour assurer un renouvellement des protéines de l'organisme. Une protéine de faible qualité fournit certains ou plusieurs acides aminés indispensables en quantité insuffisante, en particulier pour assurer l'incorporation de l'ensemble des acides aminés dans les protéines de l'organisme, c'est-à-dire que la protéine alimentaire est limitante en certains acides aminés.

Les progrès sur les connaissances des besoins en acides aminés de l'homme et des animaux indiquent qu'ils diffèrent assez fortement, entre autres parce que l'un est en maintenance et les autres en croissance. Ces considérations expliquent les différences rapportées entre le modèle animal et l'homme [13]. L'approche chez l'homme paraît donc plus pertinente.

Cependant, les mesures de bilan azoté chez l'homme montrent que cette mesure reflète également les phénomènes d'adaptation métabolique induits par la consommation à long terme de régimes protéiques différents [14, 15]. L'organisme adulte montre ainsi des modifications d'activité métabolique qui ajustent les besoins en acides aminés aux apports effectifs protéino-énergétiques [16, 17]. Ainsi, pour faire le lien avec l'introduction de ce chapitre, il est manifeste que les pertes endogènes d'azote varient en fonction de la quantité et de la qualité des protéiques dans le régime. La consommation par un individu d'une seule source protéique dans un régime le place alors dans une situation finalement biaisée d'un point de vue méthodologique. En outre, d'un point de vue pratique, la méthode du bilan azoté chez l'homme se révèle assez peu robuste [16, 18]. Signalons enfin qu'en présence de fibres ou de différents types de fibres, des modifications métaboliques et physiologiques des flux d'azote dans l'organisme rendent difficiles les comparaisons entre sources protéiques végétales non purifiées [19-21].

Si la qualité d'une protéine peut être évaluée comme sa capacité à couvrir les besoins de l'homme en acides aminés, il est alors possible d'en rendre compte en comparant la composition en acides aminés de la protéine avec les besoins en chaque acide aminé : une protéine idéale est celle qui, consommée à hauteur du besoin nutritionnel global en protéines, a une composition en acides aminés telle qu'elle permet de couvrir les besoins en chacun des acides aminés. La méthode dite du "score chimique" repose sur ce principe et compare le profil en acides aminés d'une protéine testée avec ce profil de référence [22]. L'acide aminé présent en plus faible quantité par rapport à ce profil de référence est l'acide aminé limitant et sa concentration relative détermine la valeur de l'indice chimique. Pour tenir compte de la mise à disposition effective pour l'organisme des acides aminés de la protéine, cette valeur est ensuite pondérée par la digestibilité globale de la protéine, ce qui forme l'indice PDCASS (*protein digestibility corrected amino acid score*) qui est actuellement la méthode de référence préconisée au niveau international [4, 23], même si on lui connaît des limites théoriques ou pratiques [10, 24]. Outre une certaine praticité, la méthode a l'avantage de proposer une comparaison avec des valeurs établies chez l'homme. Elle a comme inconvénient majeur de reposer sur les estimations des besoins en acides aminés, qui sont depuis longtemps un sujet de forte controverse, pour des raisons théoriques et techniques [25-28]. Nous reviendrons plus tard sur ces considérations.

Les apports des données récentes utilisant des traceurs isotopiques chez l'homme

Principe des méthodes

Face à la complexité des concepts qui sous-tendent les méthodes d'évaluation de la qualité protéique chez l'homme, certaines équipes ont proposé et mis en œuvre des approches alternatives directes qui s'appliquent assez bien au concept de qualité protéique tel que nous l'avons présenté ici. Pour évaluer la capacité d'une protéine à être retenue par l'organisme, tout en évitant l'approche long terme qui complique considérablement l'interprétation des résultats, il est possible d'essayer de distinguer spécifiquement le devenir métabolique de la protéine après son ingestion chez l'homme. L'étude de la phase postprandiale offre un intérêt supplémentaire car lors de cette phase critique pour l'homéostasie azotée, les protéines ingérées font office à la fois de signal et de substrat pour la

réalisation du gain protéique qui permet de couvrir les pertes azotées postabsorptives [29, 30].

Ces méthodes utilisent des protéines intrinsèquement et uniformément marquées à l'azote 15, l'isotope stable de l'azote, qui permettent de distinguer, par le principe de dilution isotopique, l'origine (alimentaire ou endogène) de l'azote perdu par l'organisme. L'accès expérimental au niveau intestinal (par des méthodes complexes de pose de sonde et de perfusion intestinale ou par l'étude de sujets iléostomisés) permet de mesurer les pertes d'azote ou d'acides aminés d'origine alimentaire ou endogène au niveau terminal de l'intestin grêle, permettant ainsi de déterminer la digestibilité iléale réelle. Cette mesure fournit directement la proportion d'azote ou d'acides aminés du repas qui a été absorbée par l'intestin grêle et reflète bien la mise à disposition des acides aminés ingérés pour le métabolisme postprandial. Simultanément, la méthode permet de déterminer les pertes iléales d'azote endogène pendant la période postprandiale pour évaluer dans quelle mesure l'ingestion du repas a entraîné une plus grande sécrétion ou une moindre réabsorption des sécrétions endogènes dans l'intestin.

Enfin, en mesurant les quantités d'azote d'origine alimentaire qui sont retrouvées dans les produits du catabolisme de l'azote des acides aminés (urée corporelle, azote urinaire), on peut déduire la fraction absorbée de l'azote alimentaire qui a été retenue par l'organisme pendant la phase postprandiale. Par analogie avec la mesure de la valeur biologique, on pourrait ici parler de valeur biologique réelle postprandiale.

L'utilisation des acides aminés alimentaires pour le gain protéique postprandial a été également étudiée par d'autres approches utilisant également des traceurs isotopiques. En mesurant le bilan de leucine par perfusion de leucine marquée, ces méthodes déterminent la capacité des protéines du repas à promouvoir un gain de leucine pendant la période postprandiale [30-32]. Le principe est donc différent dans la mesure où on juge ici la capacité des protéines à promouvoir le gain azoté total et non leur capacité à être retenues dans l'organisme. Les deux phénomènes sont assez fortement liés même si, dans le détail, l'utilisation des acides aminés alimentaires et endogènes peut varier au niveau du corps entier comme de certains organes [33-35]. Outre l'évaluation de la qualité protéique, ces méthodes ont également contribué à la meilleure compréhension de la mise à disposition et du métabolisme des acides aminés pendant la phase postprandiale. Elles ont ainsi pu être appliquées pour évaluer l'impact d'autres facteurs nutritionnels que la nature des protéines alimentaires, comme la charge énergétique du repas ou la présence de fibres solubles. Ces approches ont été appliquées ces dernières années à l'évaluation de la qualité protéique et fournissent des nouvelles données qui permettent de réévaluer la qualité des protéines animales et végétales et d'explorer le concept de qualité protéique.

#### Digestibilité iléale réelle des protéines

Le *tableau 1* rassemble les valeurs de digestibilité iléale réelle obtenues pour différentes sources protéiques grâce à un marquage à l'azote 15. Il s'agit de protéines de pois sous forme de farine, d'isolé de soja, d'isolé de pois (reconstitué à partir de fractions purifiées), de globulines de pois

purifiées (sous forme native), de protéines de lait purifiées, de protéines d'œuf (avant ou après cuisson).

Ces données montrent que les protéines de pois ou de lupin ont une digestibilité élevée, similaire à celle des protéines de soja, bien que les protéines de lupin aient été ingérées sous une forme non purifiée (farine). Les études ont également permis de montrer que certaines protéines pouvaient avoir une digestibilité particulièrement élevée, comme les globulines de pois. Dans l'ensemble, ces chiffres, obtenus dans notre unité ou par d'autres équipes, montrent que les protéines de légumineuses présentent une digestibilité élevée et similaire à celle de protéines animales de référence. La digestibilité des protéines varie cependant selon leur nature. Ainsi la présence à l'état natif de sous-fractions protéiques exerçant une activité anti-trypsique réduit la digestibilité des protéines de pois, mais l'impact reste modéré. Dans certaines conditions (protéines naturellement dépourvues de facteurs antinutritionnels, comme les protéines de lupin ou les globulines de pois) ou après des traitements thermiques optimisés (réduisant l'effet des facteurs antinutritionnels ou favorisant l'hydrolyse enzymatique), les protéines végétales ont ou pourraient avoir une digestibilité très élevée. Ces résultats convergent avec certaines données obtenues chez l'animal, bien qu'il soit en réalité difficile de les comparer [36]. Les procédés d'extraction, de purification et les traitements physico-chimique appliqués aux protéines alimentaires ont vraisemblablement un rôle déterminant sur leur digestibilité [37].

Si la digestibilité iléale réelle de l'azote fournit une estimation précieuse de la mise à disposition de la protéine ingérée, il est possible d'affiner encore cette estimation en mesurant les digestibilités de chacun des acides aminés. En effet, il a été montré chez l'animal que certains acides aminés pouvaient être moins bien absorbés que les autres [38]. Chez l'homme, la digestibilité iléale réelle des acides aminés issus des protéines de soja ou de lait a été mesurée [39] et les résultats ont en effet montré une certaine variabilité. Par exemple, la digestibilité de la thréonine des protéines de soja est de 89 % alors que celle de la lysine ou de la phénylalanine atteint ou dépasse 95 %. Les résultats généraux, sur l'ensemble des acides aminés, confirment une faible différence globale de digestibilité entre protéines de lait et de soja (environ 94 % pour le soja, contre 95 % pour le lait).

#### Utilisation métabolique des acides aminés alimentaires

Comparons maintenant les résultats obtenus concernant l'efficacité d'utilisation de ces protéines alimentaires pendant la phase postprandiale. Nous voyons que, après ingestion des différentes protéines de légumineuse, le catabolisme des acides aminés alimentaires s'élève à environ 20 % des quantités absorbées (*figure 1*), si bien que l'efficacité d'utilisation des protéines de pois, de soja et de lupin dans l'organisme varie entre 79 et 81 %. Ces valeurs sont numériquement légèrement plus faibles que la valeur de 85 % obtenue dans des conditions assez similaires pour les protéines de lait.

Repenser la qualité protéique ?

Ces données renouvellent la vision classique concernant la valeur des protéines végétales en montrant que l'azote des protéines de légumineuses est fortement retenu chez l'homme après ingestion. Les écarts avec les protéines animales sont notablement plus faibles que ce qui était couramment admis. En particulier, le score chimique de ces protéines n'est pas en accord avec les résultats présentés ici. Deux explications très différentes peuvent être identifiées.

Les protéines de lupin ont une valeur biologique postprandiale similaire à celle des protéines de soja, alors que les indices chimiques sont respectivement de 0,87 et 1,07 sur la base du profil de référence FAO/WHO de 1990. Cependant ce profil, établi de manière transitoire, a été très critiqué car de nombreux travaux ont montré que l'estimation du besoin en certains acides aminés conduisait à de moindres exigences pour le profil théorique [21]. Ainsi, par comparaison au nouveau profil qui a été proposé par le comité d'experts réuni sous l'égide de la FAO cette année [40], les protéines de lupin ne présentent plus d'acide aminé limitant. On peut donc penser que l'incertitude sur les besoins en acides aminés, ou sur la façon d'établir le profil à partir de ces données, pourrait ainsi expliquer en partie les écarts entre les résultats de valorisation immédiate *in vivo* des protéines végétales et l'estimation de leur qualité sur la base du score chimique. L'amélioration des connaissances concernant les besoins en acides aminés, permise par les progrès techniques, devrait permettre d'affiner ce profil de référence, mais il reste encore des inconnues sur la manière de transcrire ces données si bien que différents profils ont été proposés jusqu'ici [41].

Cependant, la révision du profil de référence n'atténue pas toutes les différences entre score chimique et efficacité biologique d'utilisation des protéines. En effet, nos mesures ne montrent pas de moindre utilisation métabolique de la fraction globuline de pois, alors que celle-ci a un indice chimique deux fois plus faible que celui des protéines de pois totales [42]. Ces différences pourraient donc être conceptuelles : peut-on comparer la valorisation immédiate des protéines (leur valeur biologique postprandiale) avec leur capacité à couvrir à long terme, comme seule source protéique, les besoins en acides aminés de l'homme (ce qui est le principe du score chimique) ? A court terme, la valorisation des protéines alimentaires ne paraît pas être étroitement liée à l'"équilibre" du régime en acides aminés à long terme. Tout d'abord, même à moyen terme, l'utilisation métabolique d'un ensemble d'acides aminés réagit de manière complexe à la composition en acides aminés et à la quantité d'acides aminés [43, 44]. Ainsi il est vraisemblable qu'à court terme, l'orientation immédiate des acides aminés dans les voies métaboliques puisse être optimale pour un profil en acides aminés différent de celui qui assure la couverture des besoins à long terme et que ce profil puisse dépendre de nombreux facteurs comme l'apport énergétique associé [34, 45-47]. En particulier, l'homme possède d'assez fortes capacités d'accommodation à des variations qualitatives aiguës de l'apport protéique [26, 48]. Ceci est corroboré par des données récentes du métabolisme de la leucine obtenues dans la phase postprandiale après ingestion de protéines de lait ou de blé [31, 49]. Une protéine alimentaire qui présente une "déficience" en un acide aminé pourrait avoir une utilisation forte, ou moins faible qu'il n'était attendu, grâce à la capacité des acides aminés endogènes à "tamponner" ce déficit de mise à disposition. Deux exemples de ces possibilités ont été présentés. Les assez fortes teneurs en lysine libre dans l'organisme (comparativement à la plupart des acides aminés) pourraient expliquer que les protéines de blé permettent un gain postprandial supérieur à celui attendu au vu de leur très faible teneur en lysine [31, 49]. De même, il est envisageable qu'une

moindre synthèse de glutathion, qui consomme des quantités importantes de cystéine, puisse expliquer la bonne rétention des acides aminés des protéines de la fraction globuline, pourtant très pauvre en acides aminés soufrés [42]. Ces capacités tampons sont plus difficiles à imaginer pour la plupart des autres acides aminés, qui n'ont ni pools libres importants ni forme spécifique non protéique apparentée à une réserve. Cependant, si on compare les protéines alimentaires avec le nouveau profil de référence, ce sont pratiquement presque toujours ces seuls acides aminés (lysine et acides aminés soufrés) qui sont susceptibles d'être limitants dans les protéines alimentaires.

Il est alors légitime de penser que, si l'organisme peut s'accommoder à court terme de l'ingestion d'une protéine à la composition sub-optimale par rapport à ses besoins à long terme, il ne pourra pas longtemps soutenir ce déficit. Ce point reste controversé, certains auteurs arguant que les capacités d'adaptation métabolique de l'organisme à long terme lui permettent de diminuer de manière très importante le besoin en certains acides aminés [31, 50], si bien que même les régimes exclusivement à base de céréales ne poseraient aucun problème nutritionnel, dans la mesure où l'apport énergétique est assuré [51]. Ces considérations restent cependant théoriques car il y a peu de données expérimentales pour évaluer l'étendue des capacités d'adaptation [52, 53]. Les conséquences de ces "adaptations" ou de ces "accommodations", sont également difficiles à évaluer [53]. D'un point de vue plus pragmatique, dans le cadre des populations des pays industrialisés, une certaine diversité des sources protéiques assure la bonne utilisation des différentes protéines alimentaires. Ainsi, la question de l'effet de la consommation à long terme de sources protéiques présentant la même "déficience" est peu pertinente pour ces populations de pays développés. Enfin, à long terme également, d'autres paramètres alimentaires, comme le niveau d'apport protéique ou énergétique pèsent sur l'utilisation des acides aminés pendant la phase postprandiale. Des travaux de notre unité ont d'ailleurs confirmé que la valeur biologique postprandiale des protéines alimentaires varie selon la quantité globale de protéines dans le régime, et ces données ont montré que les différences relatives de valorisation aiguë entre différentes sources protéiques sont plus importantes quand l'individu a suivi précédemment un régime à forte teneur en protéine [54, 55].

#### Affiner les critères de qualité des protéines

L'ensemble de ces considérations ne doit pas conduire à penser que la qualité protéique est un concept sans importance pour les populations jouissant d'un bon statut protéino-énergétique. Les données appellent plutôt à affiner et à élargir le concept de qualité protéique. En effet, si les données obtenues au niveau du corps entier tendent à montrer que l'organisme fait preuve d'une certaine robustesse quant à sa capacité à utiliser globalement l'ensemble des acides aminés alimentaires, des données obtenues pour certains zones de l'organisme ou organes soutiennent l'idée que ce n'est probablement pas le cas pour tous les acides aminés et tous les tissus [56-58]. Par exemple, les résultats obtenus par analyse compartimentale des données expérimentales de distribution et de métabolisme de l'azote des protéines de lait et de soja ont montré que la différence globale de valeur biologique entre ces deux protéines s'expliquait par une différence de rétention dans la zone périphérique [59]. Une des raisons est vraisemblablement la plus forte teneur en acides aminés ramifiés des protéines de lait, qui sont peu prélevés par la zone splanchnique (intestin, foie) et donc largement transférés dans la zone périphérique (muscle), où ils exercent un

effet stimulateur sur le transfert et l'utilisation anabolique de l'ensemble des acides aminés [59, 60]. Ainsi, dans la phase postprandiale, la composition en acides aminés pourrait influencer le métabolisme des différents tissus et définir le degré d'incorporation des acides aminés dans les différentes protéines, sans pour autant nécessairement affecter l'utilisation globale au niveau de l'ensemble de l'organisme [57]. L'analyse compartimentale à l'aide de modèles globaux du métabolisme de l'azote ou des acides aminés peut permettre de proposer une vue intégrée de la valorisation spécifique des protéines dans les différentes zones de l'organisme [61, 62]. Des progrès pourront également être accomplis en étudiant directement sur certains tissus, comme le muscle, le transport et l'utilisation anabolique des acides aminés alimentaires, en situation dynamique, ce qui appelle également à un traitement des données par analyse compartimentale [63].

Enfin, la notion de valeur protéique doit être élargie. En effet, la qualité d'une protéine peut influencer des voies spécifiques d'utilisation de certains acides aminés pour la synthèse de composés non protéiques. Une fois encore, une illustration convaincante est fournie par les acides aminés soufrés, dont la teneur dans le régime [64, 65] mais aussi dans le repas, c'est-à-dire à court terme, est capable de moduler les concentrations tissulaires en glutathion [65-68]. De manière plus générale, de nombreux acides aminés sont ainsi utilisés dans des voies métaboliques particulières, qui ont peu de lien avec le métabolisme protéique mais jouent des rôles physiologiques ou physiopathologiques de première importance [69-71]. La présence dans les protéines alimentaires de fortes quantités d'acides aminés précurseurs pourrait augmenter leur participation à ces voies d'utilisation spécifiques non protéiques, et moduler le métabolisme de l'organisme [72]. Parmi ces voies métaboliques suscitant un intérêt grandissant, on retrouve les acides aminés soufrés pour la synthèse de glutathion mais on peut également citer la production de monoxyde d'azote à partir de l'arginine, qui est reconnue comme une voie métabolique de première importance pour un nombre étonnant de situations physiopathologiques [73-75]. Dans ce dernier cas, il ne s'agit plus de considérer la rétention de l'ensemble des acides aminés des protéines alimentaires, ni même la rétention de l'arginine, car cette voie est extrêmement mineure, quantitativement parlant, chez l'adulte en bonne santé. Il s'agit plutôt de déterminer si la proportion d'arginine dans les protéines alimentaires est capable d'influencer son utilisation pour la production de monoxyde d'azote. L'importance et les répercussions physiologiques de l'apport en certains acides aminés comme l'arginine ont été montrées dans certains cas physiopathologiques chez l'animal et chez l'adulte [76]. Dans ces situations, les effets de l'arginine ne sont pas uniquement liés au bénéfice sur le métabolisme protéique [77] et ils proviendraient des capacités régulatrices de ses métabolites [78-80]. Sur cet exemple s'ouvre la perspective que les protéines alimentaires, par l'action spécifique de leurs acides aminés, jouent un rôle important dans le développement ou la prévention du risque de pathologies chroniques, qui ne relève plus du concept de "qualité protéique" mais de celui de la valeur nutritionnelle dans son acception la plus large [71]. Les études devront établir les fondements métaboliques de l'action des acides aminés et les liens avec la réponse fonctionnelle, en situation nutritionnelle, pour évaluer et comprendre la pleine valeur des protéines alimentaires pour la nutrition des populations de nos pays.

## REFERENCES

1 - Mitchell HH. A method of determining the biological value of protein. J Biol Chem 1924 ; 58 : 873-



903.

2 - 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 ; 105 : 534-42.

3. - Kies C, Fox HM, Mattern PJ, Johnson VA, Schmidt JW. Comparative protein quality as measured by human and small animal bioassays of three lines of winter wheat. *Adv Exp Med Biol* 1978 ; 105 : 91-102.

4 - FAO/WHO/UNU. Joint FAO/WHO/UNU expert consultation. Protein quality evaluation. Geneva, Switzerland: Food and Agriculture Organization/World Health Organization/United Nation University ; 1985.

5 - Friedman M. Nutritional value of proteins from different food sources. A review. *J Agric Food Chem* 1996 ; 44 : 6-29.

6 - Waylor A, Queiroz E, Scrimshaw NS, Steinke FH, Rand WM, Young VR. Nitrogen balance studies in young men to assess the protein quality of an isolated soy protein in relation to meat proteins. *J Nutr* 1983 ; 113 : 2485-91.

7 - Young VR. Soy protein in relation to human protein and amino acid nutrition. *J Am Diet Assoc* 1991 ; 91 : 828-35.

8 - Forsum E, Goranzon H, Thilen M. Protein evaluation of mixed diets in young adults, growing pigs, and growing rats. *Am J Clin Nutr* 1982 ; 36 : 505-13.

9 - Kies C. Bioavailability: a factor in protein quality. *J Agric Food Chem* 1981 ; 29 : 435-40.

10 - Mariotti F, Tomé D. Les propriétés nutritionnelles des protéines végétales en alimentation humaine (The nutritional properties of plant proteins in the human diet). *OCL* 1999 ; 6 : 487-93.

11 - 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* 1984 ; 39 : 16-24.

12 - Harper AE, Yoshimura NN. Protein quality, amino acid balance, utilization, and evaluation of

diets containing amino acids as therapeutic agents. *Nutrition* 1993 ; 9 : 460-9.

13 - Sarwar G, Peace RW, Botting HG. Corrected relative net protein ratio (CRNPR) method based on differences in rat and human requirements for sulfur amino acids. *J Assoc Off Anal Chem* 1985 ; 68 : 689-93.

14 - Young VR. Nutritional balance studies: indicators of human requirements or of adaptive mechanisms ? *J Nutr* 1986 ; 116 : 700-3.

15 - Young VR, Gucalp C, Rand WM, Matthews DE, Bier DM. Leucine kinetics during three weeks at submaintenance-to-maintenance intakes of leucine in men: adaptation and accommodation. *Hum Nutr Clin Nutr* 1987 ; 41 : 1-18.

16 - Waterlow JC. The mysteries of nitrogen balance. *Nutr Res Rev* 1999 ; 12 : 25-54.

17 - Nicol BM, Phillips PG. The utilization of dietary protein by Nigerian men. *Br J Nutr* 1976 ; 36 : 337-51.

18 - Rand WM, Young VR. Statistical analysis of nitrogen balance data with reference to the lysine requirement in adults. *J Nutr* 1999 ; 129 : 1920-6.

19 - Younes H, Rémésy C, Behr S, Demigné C. Fermentable carbohydrate exerts a urea-lowering effect in normal and nephrectomized rats. *Am J Physiol* 1997 ; 272 : G515-21.

20. - Schulze H, van Leeuwen P, Verstegen MW, Huisman J, Souffrant WB, Ahrens F. Effect of level of dietary neutral detergent fiber on ileal apparent digestibility and ileal nitrogen losses in pigs. *J Anim Sci* 1994 ; 72 : 2362-8.

21 - 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 soybean protein in human subjects: a study using intrinsically <sup>15</sup>N-labelled proteins. *Br J Nutr* 2002 ; 87 : 315-323.

22 - Hegedus M. Traditional and new concepts in protein evaluation of feeds: a review. *Acta Vet Hung* 1989 ; 37 : 3-16.

23 - FAO/WHO. Joint FAO/WHO expert consultation. Protein quality evaluation. Rome: Food and

Agriculture Organization/World Health Organization, 1990.

24 - FAO WORKING GROUP. Proteins in Human Nutrition - FAO expert consultation. Rome: Food and Agriculture Organization ; 2001.

25 - Millward J. Can we define indispensable amino acid requirements and assess protein quality in adults ? J Nutr 1994 ; 124 : 1509S-1516S.

26 - Millward DJ. Metabolic demands for amino acids and the human dietary requirement: Millward and Rivers 1988 revisited. J Nutr 1998 ; 128 : 2563S-2576S.

27 - Jackson AA. Salvage of urea-nitrogen in the large bowel: functional significance in metabolic control and adaptation. Biochem Soc Trans 1998 ; 26 : 231-6.

28 - Young VR, Borgonha S. Nitrogen and amino acid requirements: the Massachusetts Institute of Technology amino acid requirement pattern. J Nutr 2000 ; 130 : 1841S-9S.

29 - TOMÉ D, BOS C. Dietary protein and nitrogen utilization. J Nutr 2000 ; 130 : 1868S-73S.

30 - Millward DJ, Fereday A, Gibson NR, Pacy PJ. Post-prandial protein metabolism. Baillieres Clin Endocrinol Metab 1996 ; 10 : 533-49.

31 - Millward DJ, Fereday A, Gibson NR, Pacy PJ. Human adult amino acid requirements: [1-<sup>13</sup>C]leucine balance evaluation of the efficiency of utilization and apparent requirements for wheat protein and lysine compared with those for milk protein in healthy adults. Am J Clin Nutr 2000 ; 72 : 112-21.

32 - Dangin M, Boirie Y, Garcia-Rodenas C *et al.*. The digestion rate of protein is an independent regulating factor of postprandial protein retention. Am J Physiol 2001 ; 280 : E340-348.

33 - Mariotti F, Huneau JF, Mahé S, Tomé D. Protein metabolism and the gut. Curr Opin Clin Nutr Metab Care 2000 ; 3 : 45-50.

34 - Mariotti F, Mahé S, Luengo C, Benamouzig R, Tomé D. Postprandial modulation of dietary and whole-body nitrogen utilization by carbohydrates in humans. Am J Clin Nutr 2000 ; 72 : 954-62.

35 - Reeds PJ, Burrin DG, Stoll B, van der Schoor SRD, van Goudoever JB. Influence of gut metabolism

on amino acid nutrition. 62nd Minnesota Nutrition Conference Papers. Bloomington, Minnesota: University of Minnesota ; 2001.

36 - Sarwar G, Peace RW, Botting HG, Brule D. Digestibility of protein and amino acids in selected foods as determined by a rat balance method. *Plant Foods Hum Nutr* 1989 ; 39 : 23-32.

37 - Carbonaro M, Grant G, Cappelloni M, Puzsai A. Perspectives into factors limiting in vivo digestion of legume proteins: antinutritional compounds or storage proteins ? *J Agric Food Chem* 2000 ; 48 : 742-9.

38 - Hess V, Ganier P, Thibault JN, Sève B. Comparison of the isotope dilution method for determination of the ileal endogenous amino acid losses with labelled diet and labelled pigs. *Br J Nutr* 2000 ; 83 : 123-30.

39 - Gaudichon C, Bos C, Morens C *et al.* Ileal losses of nitrogen and amino acids in humans and their importance to the assessment of amino acid requirements. *Gastroenterology*: in press ; 2002.

40 - Tomé D, Bos C, Mariotti F, Gaudichon C. Protein quality and FAO/WHO recommendations. *Sci Aliments* 2002 ; 22 : 393-405.

41 - Young VR. Amino acid flux and requirements: Counterpoint ; tentative estimates are feasible and necessary. In: *medicine Comnr-FaNB-Io*, ed. *The Role of Protein and Amino Acids in Sustaining and Enhancing Performance*. Washington, D. C.: National Academy Press ; 1999 : 217-42.

42 - 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 ; 131 : 1706-13.

43 - Langer S, Fuller MF. Interactions among the branched-chain amino acids and their effects on methionine utilization in growing pigs: effects on nitrogen retention and amino acid utilization. *Br J Nutr* 2000 ; 83 : 43-8.

44 - Langer S, Scislowski PW, Brown DS, Dewey P, Fuller MF. Interactions among the branched-chain amino acids and their effects on methionine utilization in growing pigs: effects on plasma amino- and keto-acid concentrations and branched-chain keto-acid dehydrogenase activity. *Br J Nutr* 2000 ; 83 : 49-58.

45 - Lecavalier L, de Feo P, Haymond MW. Isolated hypoisoleucinemia impairs whole body but not

hepatic protein synthesis in humans. Am J Physiol 1991 ; 261 : E578-86.

46 - Krempf M, Hoerr RA, Pelletier VA, Marks LM, Gleason R, Young VR. An isotopic study of the effect of dietary carbohydrate on the metabolic fate of dietary leucine and phenylalanine. Am J Clin Nutr 1993 ; 57 : 161-9.

47 - Young VR. Nutrient interactions with reference to amino acid and protein metabolism in non-ruminants ; particular emphasis on protein-energy relations in man. Z Ernahrungswiss 1991 ; 30 : 239-67.

48 - Fuller MF, Garlick PJ. Human amino acid requirements: can the controversy be resolved? Annu Rev Nutr 1994 ; 14 : 217-41.

49 - Millward DJ, Fereday A, Gibson NR, Cox MC, Pacy PJ. Efficiency of utilization of wheat and milk protein in healthy adults and apparent lysine requirements determined by a single-meal [1-(13)C]leucine balance protocol. Am J Clin Nutr 2002 ; 76 : 1326-34.

50 - Millward DJ. Postprandial protein utilization: implications for clinical nutrition. Nestle Nutr Workshop Ser Clin Perform Programme 2000 ; 3 : 135-52.

51 - Millward DJ. The nutritional value of plant-based diets in relation to human amino acid and protein requirements. Proc Nutr Soc 1999 ; 58 : 249-60.

52 - Raguso CA, Pereira P, Young VR. A tracer investigation of obligatory oxidative amino acid losses in healthy, young adults. Am J Clin Nutr 1999 ; 70 : 474-83.

53 - Waterlow JC. The nature and significance of nutritional adaptation. Eur J Clin Nutr 1999 ; 53 Suppl 1 : S2-5.

54 - Morens C, Pueyo ME, Bos C *et al.* Dietary nitrogen excretion after ingestion of 15N-milk or 15N-soy or 15N-wheat proteins at two levels of protein intake in man. Experimental Biology. San Diego, USA ; 2000.

55 - Bos C, Morens C, Pueyo ME, Benamouzig R, Tomé D, Gaudichon C. Does increasing habitual protein intake modify the contribution of dietary amino acids to free amino acid metabolic pools ? Experimental Biology. Orlando, USA ; 2001.

56 - Leverve XM. Inter-organ substrate exchanges in the critically ill. Curr Opin Clin Nutr Metab Care

2001 ; 4 : 137-42.

57 - Fouillet H, Bos C, Gaudichon C, Tome D. Approaches to quantifying protein metabolism in response to nutrient ingestion. *J Nutr* 2002 ; 132 : 3208S-18S.

58 - Volpi E, Mittendorfer B, Wolf SE, Wolfe RR. Oral amino acids stimulate muscle protein anabolism in the elderly despite higher first-pass splanchnic extraction. *Am J Physiol* 1999 ; 277 : E513-E520.

59 - Fouillet H, Mariotti F, Gaudichon C, Bos C, Tome D. Peripheral and splanchnic metabolism of dietary nitrogen are differently affected by the protein source in humans as assessed by compartmental modeling. *J Nutr* 2002 ; 132 : 125-33.

60 - Kimball SR, Jefferson LS. Regulation of protein synthesis by branched-chain amino acids. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 2001 ; 4 : 39-43.

61 - Fouillet H, Gaudichon C, Mariotti F, Bos C, Huneau JF, Tome D. Energy nutrients modulate the splanchnic sequestration of dietary nitrogen in humans: a compartmental analysis. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2001 ; 281 : E248-60.

62 - Fouillet H, Gaudichon C, Mariotti F *et al.*. Compartmental modeling of postprandial dietary nitrogen distribution in humans. *Am J Physiol Endocrinol Metab* 2000 ; 279 : E161-75.

63 - Wolfe RR. Regulation of muscle protein by amino acids. *J Nutr* 2002 ; 132 : 3219S-24S.

64 - Lands LC, Grey VL, Smountas AA. Effect of supplementation with a cysteine donor on muscular performance. *J Appl Physiol* 1999 ; 87 : 1381-5.

65 - Morand C, Rios L, Moundras C, Besson C, Rémésy C, Demigné C. Influence of methionine availability on glutathione synthesis and delivery by the liver. *J Nutr Biochem* 1997 ; 8 : 246-55.

66 - Simbelie KL, Mariotti F, Makarios-Lahham L *et al.* alpha-lactalbumin ingestion favors high hepatic Glutathione level in a condition of oxidative stress. *Experimental Biology*. San Diego, USA ; 2003.

67 - Griffith OW. Biologic and pharmacologic regulation of mammalian glutathione synthesis. *Free Radic Biol Med* 1999 ; 27 : 922-35.

68 - Tateishi N, Higashi T, Naruse A, Hikita K, Sakamoto Y. Relative contributions of sulfur atoms of

dietary cysteine and methionine to rat liver glutathione and proteins. *J Biochem (Tokyo)* 1981 ; 90 : 1603-10.

69 - Reeds PJ, Hutchens TW. Protein requirements: from nitrogen balance to functional impact. *J Nutr* 1994 ; 124 : 1754S-1764S.

70 - Reeds PJ. Dispensable and indispensable amino acids for humans. *J Nutr* 2000 ; 130 : 1835S-40S.

71 - Mariotti F, Huneau JF, Tome D. Dietary protein and cardiovascular risk. *J Nutr Health Aging* 2001 ; 5 : 200-4.

72 - Young VR, Ajami AM. Metabolism 2000: the emperor needs new clothes. *Proc Nutr Soc* 2001 ; 60 : 27-44.

73 - Wu G, Meininger CJ. Arginine nutrition and cardiovascular function. *J Nutr* 2000 ; 130 : 2626-9.

74 - Kingwell BA. Nitric oxide-mediated metabolic regulation during exercise: effects of training in health and cardiovascular disease. *Faseb J* 2000 ; 14 : 1685-96.

75 - Scherrer U, Sartori C. Defective nitric oxide synthesis: a link between metabolic insulin resistance, sympathetic overactivity and cardiovascular morbidity. *Eur J Endocrinol* 2000 ; 142 : 315-23.

76 - Cynober L. Les pharmaconutriments azotés : du tube à essai à la pratique clinique. *Cah Nutr Diet* 2001 ; 36 : 273-84.

77 - Bruins MJ, Soeters PB, Lamers WH, Deutz NE. L-arginine supplementation in pigs decreases liver protein turnover and increases hindquarter protein turnover both during and after endotoxemia. *Am J Clin Nutr* 2002 ; 75 : 1031-44.

78 - Blantz RC, Satriano J, Gabbai F, Kelly C. Biological effects of arginine metabolites. *Acta Physiol Scand* 2000 ; 168 : 21-5.

79 - Bruins MJ, Soeters PB, Lamers WH, Meijer AJ, Deutz NE. L-arginine supplementation in hyperdynamic endotoxemic pigs: effect on nitric oxide synthesis by the different organs. *Crit Care Med* 2002 ; 30 : 508-17.

80 - Wu G, Morris SM, Jr. Arginine metabolism: nitric oxide and beyond. *Biochem J* 1998 ; 336 : 1-17.

81 - Gaudichon C, Mahé S, Benamouzig R *et al.* Net postprandial utilization of [<sup>15</sup>N]-labeled milk protein nitrogen is influenced by diet composition in humans. *J Nutr* 1999 ; 129 : 890-5.

82 - Evenepoel P, Geypens B, Luybaerts A, Hiele M, Ghooos Y, Rutgeerts P. Digestibility of cooked and raw egg protein in humans as assessed by stable isotope techniques. *J Nutr* 1998 ; 128 : 1716-22.

#### Illustrations

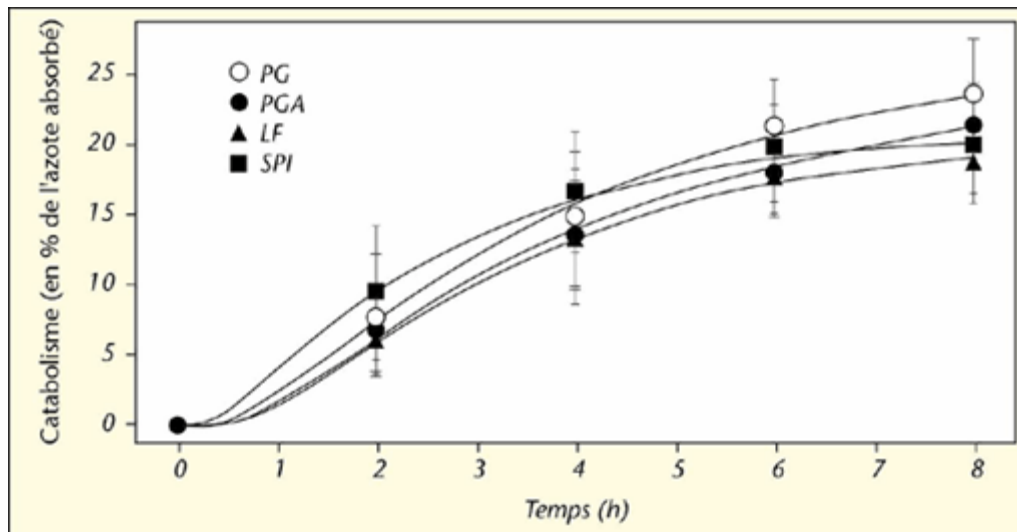


Figure 1 - Catabolisme de l'azote des acides aminés alimentaires (en % de l'azote absorbé) après ingestion (temps zéro) de globulines de pois (PG) ou d'un isolé de pois (mélange de globulines et d'albumine en proportion d'origine (PGA) ou de farine de lupin blanc (LF) ou d'un isolé de soja (SPI), chez le volontaire sain.



<b>Protéines</b>		<b>Digestibilité iléale réelle</b>	<b>Références</b>
<b>Origine</b>	<b>Forme</b>		
Lupin	Farine	91 %	[21]
Soja	Isolé	91-92 %	[34]
Pois	Isolé*	90 %	[42]
	Globulines	94 %	[42]
Lait	Protéines purifiées	95 %	[81]
Œuf	Blanc (cuit)	91 %	[82]
	Blanc (cru)	51 %	[82]

---

Tableau 1 - Digestibilité iléale réelle de différentes protéines végétales chez l'homme  
\* globulines et albumines en proportion d'origine

---