



HAL
open science

Les “ dessous ” du PD-CAAS et du DIAAS, deux critères en apparence simples de qualité nutritionnelle des protéines

Romain Tessier, Juliane Calvez, Claire C. Gaudichon

► To cite this version:

Romain Tessier, Juliane Calvez, Claire C. Gaudichon. Les “ dessous ” du PD-CAAS et du DIAAS, deux critères en apparence simples de qualité nutritionnelle des protéines. Cahiers de Nutrition et de Diététique, 2021, 56 (2), pp.102-110. 10.1016/j.cnd.2021.02.002 . hal-03295555

HAL Id: hal-03295555

<https://hal.inrae.fr/hal-03295555v1>

Submitted on 23 Aug 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les « dessous » du PD-CAAS et du DIAAS, deux critères en apparence simples de qualité nutritionnelle des protéines

Underside information on PD-CAAS and DIAAS, two seemingly simple protein quality criteria

Auteurs :

Romain Tessier, Juliane Calvez, Claire Gaudichon

Adresse du laboratoire :

Université Paris-Saclay, AgroParisTech, INRAE, UMR PNCA, 75005, Paris, France

Responsable de la correspondance :

Claire Gaudichon, Professeur

Adresse : AgroParisTech UMR914 PNCA, 16 rue Claude Bernard, F-75005 Paris, France

Mél : claire.gaudichon@agroparistech.fr

Téléphone: +33 1 44 08 18 29

Fax: +33 1 44 08 18 56

Introduction

La qualité d'une protéine correspond à sa capacité à fournir les neuf acides aminés indispensables en quantité suffisante pour permettre le renouvellement optimal des protéines corporelles. La composition en acides aminés d'une source protéique est donc un déterminant majeur de sa qualité. En outre, l'efficacité d'assimilation des protéines est un facteur à prendre en compte car elle influence la quantité réelle d'acides aminés absorbés et donc disponibles pour les synthèses protéiques. Deux indices simples, le PD-CAAS (pour Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score) et le DIAAS (pour Digestible Indispensable Amino Acid Score), sont actuellement utilisés car ils agrègent en une seule valeur ces deux déterminants de la qualité protéique. Cependant, leur détermination comporte de nombreux questionnements et points critiques que nous nous proposons de détailler dans cette revue. Ils concernent notamment la teneur réelle en acides aminés des sources protéiques, le profil de référence de la protéine idéale ou encore les méthodes de détermination de la digestibilité.

Points essentiels :

- Le PD-CAAS et le DIAAS sont des scores chimiques corrigés de la digestibilité.
- Leur principale différence concerne la méthodologie de mesure de la digestibilité.
- Le facteur 6,25 de conversion d'azote en protéines sous-estime le score chimique.
- L'utilisation du poids moléculaire libre des acides aminés surestime le score chimique.
- La comparaison des scores de qualité doit se faire à méthodologies comparables.

1. Définitions des scores

Le PD-CAAS et le DIAAS reposent en premier lieu sur un indice, le score chimique, qui reflète la composition de la source protéique en acides aminés indispensables au regard des besoins nutritionnels en ces acides aminés. Le score chimique correspond au plus petit des rapports entre la teneur de chaque acide aminé indispensable dans la protéine étudiée et celle présente dans la protéine de référence [1].

$$\text{Score chimique} = \frac{\text{mg de l'AA limitant dans 1g de protéine alimentaire}}{\text{mg de ce même AA dans 1g de protéine de référence}}$$

La protéine de référence est une protéine fictive et idéale, dont le profil est basé sur l'adéquation aux besoins en acides aminés indispensables de l'Homme. Comme nous allons le voir, ce profil a évolué avec la réévaluation des valeurs de besoins en acides aminés. Le score chimique reflète au final la quantité de l'acide aminé indispensable le plus limitant par rapport au profil de référence.

Le score chimique corrigé de la digestibilité a été proposé par la FAO en 1991 [2]. Ce score appelé PD-CAAS consiste à pondérer le score chimique de la protéine par sa digestibilité vraie de l'azote mesurée à partir des pertes digestives.

$$\text{PD - CAAS} = \text{Score chimique} \times \text{digestibilité vraie de la protéine}$$

Comme expliqué par Schaafsma [3], le PD-CAAS a été créé pour évaluer la capacité réelle d'un régime alimentaire plus ou moins digestible et pouvant contenir une source monotone de protéines ou au contraire des sources multiples, à apporter suffisamment d'acides aminés indispensables. Il permet de révéler l'existence d'acides aminés limitants. S'il est inférieur à 1 c'est qu'au moins un des acides aminés du régime ou de la protéine est limitant. En revanche, comme ce score est plafonné à 100%, il ne renseigne pas sur les apports excédentaires par rapport aux besoins nutritionnels.

En 2013, la FAO a recommandé l'utilisation du DIAAS afin de pallier certaines limites du PD-CAAS [4]. Il est notamment proposé d'utiliser une valeur plus fine de la digestibilité, à savoir celle des acides aminés individuels et non de la protéine.

$$\text{DIAAS} = \text{Score chimique} \times \text{digestibilité iléale vraie de l'acide aminé}$$

Il a en effet été montré que la digestibilité pouvait varier de manière significative d'un acide aminé à l'autre [5,6]. A la différence de la digestibilité protéique qui peut être évaluée à partir des pertes fécales en azote, la digestibilité des acides aminés doit être mesurée au niveau iléal, ce qui comporte des contraintes méthodologiques que nous développerons ci-après. Contrairement au PD-CAAS, le DIAAS n'est pas tronqué à 1. En l'absence d'acide aminé limitant, il peut donc refléter la capacité d'une protéine à compenser les déficits d'autres sources protéiques.

Pour calculer le score chimique d'un ingrédient protéique, il est nécessaire d'évaluer la quantité de protéines de cet ingrédient, sa composition en acides aminés et de la comparer à un profil de référence. Pour déterminer le PD-CAAS et le DIAAS, il est en plus nécessaire d'évaluer la digestibilité de l'azote ou des acides aminés individuels. Ainsi dans la détermination de ces scores, de nombreux points critiques et sujets à discussion existent et peuvent, selon les méthodes, facteurs ou valeurs choisis induire des différences non négligeables entre les valeurs obtenues.

2. Choix du profil d'acides aminés de référence

Dans le calcul du PD-CAAS et du DIAAS, le choix du profil en acides aminés de la protéine de référence est primordial. Ce profil a évolué entre la consultation du groupe d'experts FAO sur la qualité des protéines en 1990 [2] et en 2011 [4]. La première raison est la réactualisation des valeurs de besoins en acides aminés en 2007 [7], les précédentes datant de 1985 et la méthodologie ayant évolué depuis [8]. Par ailleurs, les classes d'âge utilisées pour établir ces profils diffèrent. A l'époque de l'élaboration du PD-CAAS, la protéine de référence préconisée correspondait au profil de besoins des enfants en âge préscolaire (2-5 ans) de 1985. Un profil de référence spécifique était aussi proposé pour les enfants de moins d'un an et correspondait à la composition en acides aminés du lait maternel.

Pour le DIAAS, le groupe d'experts a établi 3 profils de référence à partir des besoins réactualisés en 2007 : pour les nourrissons de moins de 6 mois, pour les enfants entre 6 mois et 3 ans et pour les enfants de plus de 3 ans, les adolescents et les adultes [4] (Tableau 1). Il est à noter que dans ce même rapport, il est conseillé de n'utiliser que deux profils, celui des nourrissons pour les laits infantiles et celui des enfants de 6 mois à 3 ans pour les autres aliments, si la détermination du DIAAS est à vocation commerciale ou réglementaire. Les besoins en acides aminés étant plus élevés chez les plus jeunes, cette alternative de n'utiliser que deux profils est donc plus pénalisante. La revue de Herreman *et al.* [9] illustre bien l'impact du profil de référence sur les scores de qualité en calculant le DIAAS de 12 protéines végétales et de 5 protéines animales selon les 3 profils de référence. L'utilisation du profil « 6 mois - 3 ans » au lieu du profil « > 3 ans » pénalise notamment le DIAAS des légumineuses (lupin, pois et soja) mais aussi des protéines de lactosérum parmi les sources animales. Le profil de

référence à utiliser peut ainsi être sujet à interprétation et l'utilisation d'un profil au profit d'un autre peut diminuer ou améliorer les scores de qualité d'une protéine. Le PD-CAAS obtenu pour une source protéique a ainsi pu évoluer depuis 1990. Par exemple, le PD-CAAS d'un concentrat de protéines de pois est passé de 75 (pour le tryptophane) avec le profil pour enfants en âge préscolaires (2 à 5 ans) de 1991 à 71 (pour les acides aminés soufrés) en utilisant le profil pour enfants de 6 mois à 3 ans de 2013 [10].

	Rapport FAO 1991 [2]				Rapport FAO 2013 [4]		
	Nourrisson (0-1 an)	Enfant préscolaire (2-5 ans)	Enfant (10-12 ans)	Adulte	Nourrisson (0-6 mois)	Enfant (6 mois - 3 ans)	Enfant (>3 ans), adolescent, adulte
Histidine	26	19	19	16	21	20	16
Isoleucine	46	28	28	13	55	32	30
Leucine	93	66	44	19	96	66	61
Lysine	66	58	44	16	69	57	48
AA soufrés	42	25	22	17	33	27	23
AA aromatiques	72	63	22	19	94	52	41
Thréonine	43	34	28	9	44	31	25
Tryptophane	17	11	9	5	17	8,5	6,6
Valine	55	35	25	13	55	43	40

Tableau 1. Profils de référence des protéines basés sur les besoins en acides aminés indispensables, en mg/g de protéines, selon les catégories d'âge, publiés en 1991 et 2013. D'après [2,4]. AA, acides aminés.

3. Choix du facteur de conversion de l'azote en protéines et du poids moléculaire des acides aminés

Lors du calcul du score chimique et de ses dérivés que sont le PD-CAAS et le DIAAS, il est nécessaire de quantifier les teneurs massiques en acides aminés dans la source protéique, exprimées en mg/100g de protéines. Pour cela, la quantité de protéines dans la source protéique ainsi que la quantité de chaque acide aminé indispensable sont à déterminer. Des points critiques dans ces déterminations sont le choix du facteur de conversion de l'azote en protéines et du poids moléculaire des acides aminés.

Les ingrédients protéiques sont plus ou moins riches en protéines et pour évaluer la quantité de protéines, il existe deux méthodes. La première consiste à déterminer la quantité d'azote dans l'ingrédient puis à utiliser un facteur de conversion de l'azote en protéines. La seconde méthode consiste à déterminer l'aminogramme complet de l'ingrédient et à considérer la quantité de protéines comme la somme des acides aminés (Figure 1).

Dans le premier cas, le facteur utilisé par défaut est 6,25 qui provient de l'hypothèse selon laquelle les protéines contiennent 16% d'azote. Mais les protéines n'ont pas le même pourcentage d'azote puisque leur composition en acides aminés est variable et que tous les acides aminés n'ont pas le même nombre d'atomes d'azote. D'autre part, les ingrédients protéiques contiennent de l'azote non protéique et des groupements prosthétiques (groupements ajoutés après la transcription). L'azote non protéique correspond à l'azote non inclus dans les protéines, comme les phospholipides, les alcaloïdes, l'urée, les acides nucléiques ou les vitamines. Selon les définitions, on peut y inclure aussi les acides aminés libres ou les petits peptides [11]. En incluant les acides aminés libres, l'azote non protéique représente environ 5% de l'azote total dans le lait de vache [12]. Un facteur de conversion unique pour tous les ingrédients protéiques est donc source de beaucoup d'imprécision. Il existe plusieurs façons d'estimer le facteur de conversion spécifique d'une protéine, en tenant compte ou non des groupements prosthétiques. Dans une revue de la littérature, Mariotti *et al.* ont comparé les données de plusieurs études et ont colligé des facteurs spécifiques de conversion [13].

Pour illustrer l'impact du facteur de conversion sur le score chimique, prenons par exemple les données de composition en acides aminés des lentilles, selon la base de données FoodData de l'USDA [14], calculées avec le facteur de conversion de 6,25 ou celui des légumineuses de 5,40 [13]. Comme le montre la Figure 2, si les acides aminés les plus limitants restent toujours les acides aminés soufrés, le score chimique est inférieur à 1,0 avec un facteur de conversion de 6,25 (0,94) alors qu'il est supérieur à 1,0 avec le facteur 5,40 (1,09). Cela montre que selon le facteur de conversion choisi, une protéine peut être limitée ou non en un acide aminé indispensable.

La quantité de protéines d'un ingrédient peut également être définie comme la masse totale d'acides aminés. L'inconvénient de cette approche est que l'analyse des acides aminés nécessite une étape d'hydrolyse de la macromolécule pour libérer les acides aminés, et que

les rendements d'hydrolyse sont difficiles à estimer avec certitude [11]. Elle est donc plus rarement utilisée en pratique.

Un deuxième facteur influençant le score chimique est la masse moléculaire des acides aminés utilisée pour la détermination du profil en acides aminés. En effet, les concentrations en acides aminés sont obtenues en mmol/g d'échantillon et il faut les convertir en g d'acides aminés pour 100 g d'échantillon puis pour 100 g de protéines, en utilisant le poids moléculaire des acides aminés. Or celui-ci diffère selon que l'acide aminé est lié dans une protéine (« en chaîne ») ou sous forme libre. En effet au moment de la rupture des liaisons peptidiques, une molécule d'eau se lie à l'acide aminé libéré [15] et le poids moléculaire de l'acide aminé libre est donc de 18 g/mol plus élevé que le poids moléculaire « en chaîne ». Par défaut, le poids moléculaire utilisé pour convertir la quantité molaire d'acide aminé en quantité massique est le poids moléculaire libre (par exemple 117,2 g/mol pour la valine). Or cela surestime virtuellement les quantités d'acides aminés et il est préférable d'utiliser le poids moléculaire « en chaîne » [15]. Quelques études seulement précisent le poids moléculaire utilisé pour le calcul [6,16,17]. La Figure 1, en plus de l'impact du facteur de conversion sur le score chimique, présente celui de l'utilisation du poids moléculaire libre ou « en chaîne » des acides aminés. Le score chimique est plus élevé lorsqu'il est calculé avec le poids moléculaire des acides aminés libres. Ainsi, avec un facteur de conversion de 5,40, les acides aminés soufrés ont un score de 1,09 avec l'utilisation du poids moléculaire libre (149,2 g/mol et 240,3 g/mol pour la méthionine et la cystéine respectivement) alors qu'en prenant le poids moléculaire « en chaîne » (131,2 et 222,3 g/mol respectivement), le score est tout juste à 1 (0,99). Ainsi, l'utilisation du poids moléculaire libre des acides aminés améliore virtuellement la qualité des protéines. Tout comme le facteur de conversion de l'azote en protéines, il est donc primordial de connaître l'information sur le poids moléculaire utilisé pour le calcul des scores de qualité (score chimique, PD-CAAS et DIAAS) des sources de protéines afin de pouvoir comparer entre elles les données obtenues dans les différentes études.

4. Mesure de la digestibilité

La mesure de la digestibilité des protéines et des acides aminés permettant de pondérer le score chimique comporte de nombreuses complexités méthodologiques, concernant le

modèle (Homme, porc, rat) et le site de prélèvement (fécal ou iléal) des contenus digestifs notamment.

4.a. Choix du modèle

La digestibilité doit être préférentiellement mesurée chez l'Homme mais l'accès au contenu intestinal est difficile. Si les mesures au niveau fécal sont acceptables pour la détermination de la digestibilité protéique, il en est autrement pour la digestibilité des acides aminés [18]. Des recueils iléaux sont possibles chez l'Homme, soit de manière invasive *via* une sonde naso-iléale [19,20], soit chez des patients iléostomisés dont l'accès au contenu iléal est direct. Comme, les iléostomies sont pratiquées suite à des pathologies digestives graves comme le cancer du côlon ou la maladie de Crohn [21], la représentativité de ces sujets comme modèles de l'Homme sain est questionnable. Notamment, des modifications morphologiques et microbiennes de l'iléon terminal tendraient à conférer aux digestats iléaux de ces patients des caractéristiques coliques [22].

Le modèle porcin est le modèle le plus proche de l'Homme en termes d'anatomie et de physiologie digestives [18,23]. L'utilisation de canules iléales permet le recueil en continu des effluents iléaux [24,25]. En revanche, il demande plus d'espace et est plus coûteux que le rat qui peut être hébergé en grand nombre dans des espaces plus restreints. Contrairement à l'Homme, le rat possède un caecum développé entre l'intestin grêle et le côlon [26]. En outre, ses besoins en acides aminés indispensables sont 1,7 fois supérieurs à ceux de l'Homme alors que les besoins du porc ne le sont que 1,2 fois [27]. Cette différence est surtout importante pour les acides aminés soufrés où il existe un facteur 3 entre le rat et l'Homme.

Les valeurs de digestibilité entre les différents modèles ont été comparées dans certaines études. Il faut toutefois noter que les comparaisons inter-études sont à considérer avec prudence car outre le modèle, les méthodologies peuvent différer et cela influence les résultats. L'étude de Rowan *et al.* [18] rapporte une digestibilité iléale vraie des acides aminés d'un repas complet supérieure chez l'Homme iléostomisé par rapport au porc, avec des différences allant de 0,1% à 8,1% selon les acides aminés, mais une autre étude comparant la digestibilité de protéines purifiées (caséine et colza) a montré un résultat inverse [28], avec une digestibilité iléale vraie supérieure de 3% pour l'azote et entre 0,2 et 6% pour les acides aminés chez le porc par rapport à l'Homme. Une bonne corrélation entre les deux modèles

était cependant rapportée ($r^2 = 0,94$). Chez le rat, les digestibilités sont en général supérieures à celles évaluées chez l'Homme. C'est par exemple le cas pour des isolats de protéines de lait et de soja, très digestibles, pour lesquels la digestibilité iléale vraie moyenne des acides aminés chez le rat était supérieure respectivement de 1,1% et 2,1% à celle de l'Homme [5,29]. Il a aussi été remarqué que des protéines peu digestibles par l'Homme pouvaient être bien digérées par le rat. Ainsi, la digestibilité iléale d'un isolat de colza était de 84% chez l'Homme [30] alors qu'elle était de 95,1% chez le rat [31]. Néanmoins, les différences entre ces deux modèles ne sont pas toujours consensuelles. Par exemple, la digestibilité de la caséine est parfois inférieure chez le rat par rapport à l'Homme, parfois supérieure [27,28,32]. D'après Deglaire et Moughan [27], la corrélation de la digestibilité fécale vraie de l'azote entre l'Homme et le rat est assez bonne ($r^2 = 0,92$), et les différences de digestibilité fécale pourraient être dues à la différence anatomique au niveau du gros intestin. La comparaison des deux modèles que sont le rat et le porc a fait l'objet d'une étude en 2003 portant sur plusieurs sources de protéines [29], avec une digestibilité iléale des acides aminés globalement similaire entre les deux modèles, mais avec de grandes disparités selon les acides aminés.

Ainsi en fonction du modèle (Homme, porc, rat) utilisé pour évaluer la digestibilité des protéines et des acides aminés, des différences importantes peuvent exister. Il n'y a actuellement pas d'équation de régression inter-espèce validée permettant d'estimer la digestibilité pour l'Homme d'une protéine à partir des modèles animaux et il est ainsi important de prendre en considération le modèle utilisé dans la détermination de la digestibilité utilisée pour le calcul du PD-CAAS ou du DIAAS lorsque l'on compare des résultats entre eux.

4.b. Méthodes de mesure de la digestibilité

Comme mentionné plus haut, la mesure des pertes digestives permettant d'évaluer la digestibilité des protéines peut se faire en prélevant les digestats à différents niveaux du tube digestif. Ainsi, la digestibilité protéique fécale a été déterminée dans de nombreuses études en raison de la facilité d'accès aux fèces. Les fractions protéiques non digérées à la fin de l'intestin grêle sont cependant soumises à des modifications par le microbiote colique [33]. Les bactéries intestinales peuvent transformer les acides aminés en métabolites contenant de

l'azote, dont une partie peut être absorbée comme les polyamines, les indoles ou l'ammoniaque [34]. Ces modifications ont pour conséquence de surestimer plus ou moins la digestibilité fécale, selon les modèles d'études et la digestibilité des protéines, de 2% à 20% [6,35]. Cette erreur étant considérée comme tolérable, ce qui est toutefois discutable lorsque la surestimation dépasse 5%, le recours à la digestibilité fécale pour la détermination du PD-CAAS est possible [2]. En revanche, le recours à la digestibilité fécale n'est pas admis en ce qui concerne les acides aminés individuels en raison de modifications majeures pouvant affecter spécifiquement certains acides aminés. Il a donc été recommandé d'évaluer la digestibilité des acides aminés au niveau iléal pour le calcul du DIAAS [4].

Pour ce faire, il est nécessaire de collecter les effluents au niveau de l'iléon terminal, ce qui est possible chez l'Homme et le porc. Chez le rat, la mesure de la digestibilité iléale est problématique car il n'est pas possible de poser de canules intestinales et le volume de digesta dans l'iléon terminal prélevé à l'euthanasie est faible. Afin de surmonter ces problèmes, deux stratégies existent. La première consiste à charger le contenu iléal en administrant des petits repas répétés au cours du temps et à prélever ce contenu iléal à un temps donné, en faisant l'hypothèse que ce contenu est globalement représentatif de l'ensemble de la cinétique de digestion [6,17]. La seconde consiste à réaliser un bilan d'acides aminés au niveau caecal dans une fenêtre postprandiale courte de 5 à 6 heures après la digestion [36,37], en faisant l'hypothèse que la transformation bactérienne des acides aminés est limitée à ce stade. Ces hypothèses n'ayant pas fait l'objet de validations *ad hoc*, ces deux méthodes présentent des incertitudes mais sont néanmoins des compromis intéressants pour l'utilisation du rat comme modèle alternatif.

Quel que soit le modèle utilisé pour le recueil des digestas, une autre source de variation est la façon de distinguer l'azote ou les acides aminés alimentaires de ceux d'origine endogène, cette distinction étant nécessaire pour déterminer la digestibilité vraie des protéines et acides aminés dans les sources alimentaires. Lorsque les flux endogènes sont mesurés en l'absence de protéines dans le régime, soit chez les mêmes animaux/individus dans un protocole en cross-over [24], soit dans un groupe dédié lorsque le cross-over est impossible [20], on peut alors calculer la digestibilité standardisée. Cette méthode présente des incertitudes, elle tend notamment à sous-estimer la quantité de protéines endogènes secrétées en présence d'un repas protéique [22]. Le recours aux marquages avec des isotopes stables, soit des sources

alimentaires [19,36,37] soit des sécrétions endogènes par perfusion intraveineuse d'un acide aminé marqué [25], permet de distinguer directement les deux flux azotés pour déterminer la digestibilité dite réelle. Ces méthodes sont plus précises, mais plus coûteuses et plus complexes analytiquement, et présentent aussi une part d'erreur inhérente au recyclage entéro-hépatique des traceurs.

Récemment, une nouvelle méthode peu invasive de détermination de digestibilité des acides aminés chez l'Homme a été proposée. Il s'agit de la méthode du double traceur qui consiste à marquer intrinsèquement la protéine à tester avec du deutérium [38,39]. Elle est ensuite administrée dans un repas test en même temps qu'une petite quantité d'une protéine standard de digestibilité connue et fortement enrichie en ^{13}C . La protéine standard utilisée est soit un mélange d'acides aminés libres, 100% digestibles, soit de la spiruline, seule source riche en protéines fortement enrichies en ^{13}C disponible dans le commerce. Au final, la méthode consiste à comparer pour un acide aminé donné le rapport $^2\text{H}/^{13}\text{C}$ dans l'aliment et dans le sang, après ingestion du repas, ce qui rend compte de l'absorption de l'acide aminé de la protéine à tester par rapport à celui de la protéine standard. Cette méthode comporte des avantages car elle permet de s'affranchir des incertitudes évoquées précédemment quant aux recueils digestifs et à la distinction des sources exogènes et endogènes d'acides aminés. Cependant, elle est analytiquement lourde et complexe. Par ailleurs, il s'agit d'une méthode indirecte qui n'a pas été validée contre les méthodes directes de quantification des pertes dans les digestas.

5. Comparaison des scores de qualité PD-CAAS / DIAAS

Au final, la différence majeure entre la détermination du PD-CAAS non tronqué à 1 et le DIAAS est la mesure de la digestibilité : digestibilité protéique iléale, caecale ou fécale pour le PD-CAAS, digestibilité iléale des acides aminés pour le DIAAS. Étant donné l'impact du modèle et de la méthode de mesure de la digestibilité sur les résultats, la comparaison rigoureuse des scores de PD-CAAS et DIAAS doit se faire à méthodologies et modèles comparables. Deux études [6,10] ont comparé le PD-CAAS et le DIAAS de plusieurs sources de protéines (Tableau 2). Pour cela les auteurs ont utilisé le profil des enfants de 6 mois à 3 ans et le PD-CAAS non tronqué. Pour toutes les sources protéiques présentées, l'acide aminé limitant était identique

entre le PD-CAAS et le DIAAS. En moyenne, le PD-CAAS donnait un score supérieur de 3% au DIAAS mais pour certaines sources protéiques, le DIAAS était plus élevé que le PD-CAAS (par exemple pour l'isolat de lactosérum chez le porc et le riz cuit chez le rat). Dans un seul cas, pour l'isolat de lactosérum, l'histidine, limitante avec le PD-CAAS, ne l'était plus avec le DIAAS [10]. Ainsi, il semble que l'utilisation du DIAAS au lieu du PD-CAAS pénalise le score de qualité de la source de protéines dans la majorité des cas. Néanmoins, la composition en acides aminés de la source protéique étant la donnée primordiale dans le calcul de ces scores, la correction par la digestibilité des acides aminés et non de la protéine, n'induit généralement pas de différences majeures sur l'acide aminé limitant.

	Rat [6]			Porc [10]		
	AA limitant	PD-CAAS	DIAAS	AA limitant	PD-CAAS	DIAAS
Concentrat de protéine de lait	AAS	1,25	1,18	AAS	1,21	1,20
Isolat de lactosérum	His	1,12	1,09	His	0,97	1,00
Concentrat de lactosérum	His	0,99	0,97	His	1,07	1,07
Isolat de soja	AAS	0,97	0,91	AAS	0,86	0,84
Concentrat de pois	AAS	0,86	0,82	AAS	0,71	0,62
Pois cuits	AAS	0,58	0,58	/	/	/
Riz cuit	Lys	0,56	0,59	/	/	/
Son de blé	Lys	0,48	0,41	/	/	/
Concentrat de colza	Lys	0,38	0,37	/	/	/
Poudre de lait écrémé	/	/	/	AAS	1,12	1,05
Blé	/	/	/	Lys	0,51	0,45
Farine de soja	/	/	/	AAS	0,93	0,89

Tableau 2. Comparaison des valeurs de DIAAS et PD-CAAS obtenus avec deux modèles animaux pour plusieurs sources protéiques. AAS, acides aminés soufrés (méthionine et cystéine) ; His, histidine ; Lys, lysine. D'après [6,10].

Conclusion

La composition en acides aminés indispensables d'une source protéique et l'efficacité d'assimilation de ses acides aminés sont des déterminants majeurs de sa qualité. Le PD-CAAS et le DIAAS sont actuellement largement utilisés pour rendre compte simplement de la qualité des sources protéiques. Leurs principales caractéristiques sont indiquées dans le Tableau 3. D'apparence simple, le calcul de ces scores sous-tend de nombreux points critiques. Ainsi, le choix du facteur de conversion de l'azote en protéines, du poids moléculaire des acides aminés (libres ou « en chaîne ») ou encore du profil de référence d'acides aminés, influence le score obtenu. En outre, le modèle et la méthodologie utilisés pour déterminer la digestibilité de la protéine et des acides aminés sont aussi des facteurs de variation. Chaque modèle (Homme, porc, rat) présente des avantages et des inconvénients que ce soit en termes de facilité de mise en œuvre des études, d'éthique, de coûts et de validité des mesures. Bien que préférées, les études chez l'Homme peuvent difficilement être réalisées en routine et les modèles animaux restent à l'heure actuelle utiles pour obtenir des données sur une grande variété de sources protéiques, sous forme pure ou dans des aliments. Dans tous les cas, les choix méthodologiques doivent être justifiés et indiqués clairement afin de pouvoir comparer de manière rigoureuse les résultats des différentes études entre les sources protéiques.

	PD-CAAS	DIAAS
Documents de référence		
<ul style="list-style-type: none"> • Besoins en AA • Profils de référence 	1985 [8] 1991 [2]	2007 [7] 2013 [4]
Profils de référence	Nourrissons 0 – 1 an Enfants 2 – 5 ans <i>NB : remplacés par les profils actualisés en 2013</i>	Nourrissons 0 – 6 mois Enfants 6 mois – 3 ans Enfants >3 ans (facultatif)
Troncature	1	-
Digestibilité	Protéine	Acides aminés individuels
Modèles	Homme/porc/rat	Homme > porc (> rat)
	Iléal/caecal/fécal	Iléal

Tableau 3. Principales différences entre le PD-CAAS et le DIAAS

Résumé

Le PD-CAAS et le DIAAS rendent compte simplement de la qualité d'une protéine sur la base de sa digestibilité et de sa composition en acides aminés indispensables comparée à une composition de référence. Le calcul de ces scores comporte des points critiques, parmi lesquels le profil de référence utilisé selon la tranche d'âge. Par ailleurs, le facteur de conversion de l'azote en protéine utilisé pour quantifier les protéines dans l'ingrédient a un impact, le facteur 6,25 pénalisant généralement les scores de qualité. De même, l'utilisation du poids moléculaire libre ou « en chaîne » des acides aminés pour déterminer le profil en acides aminés de la protéine influence les scores. Il est donc primordial que ces paramètres soient renseignés. Enfin, selon le modèle (Homme, porc ou rat) et la méthodologie (mesure iléale ou fécale, évaluation des pertes endogènes ou utilisation de traceurs isotopiques) utilisés pour évaluer la digestibilité, les valeurs peuvent varier et il est important de considérer ces aspects pour interpréter ces scores et comparer les sources protéiques entre elles.

Mots clés : Score chimique, profils de référence, digestibilité, acides aminés

PD-CAAS and DIAAS are indexes that simply reflect protein quality based on protein digestibility and the amino acid composition of the protein relatively to a reference composition. The calculation of these scores raises critical points, among which the amino acid pattern of the reference protein depending on the age range. Moreover, the factor 6.25 used to convert nitrogen to protein to quantify the protein amount in the protein ingredient generally overestimates the protein content, resulting in an underestimation of quality scores. Additionally, using free or "in-chain" molecular weight to estimate amino acids content affects significantly the score. Hence, it is important to clearly specify these parameters in the studies. Lastly, the model used to determine digestibility (Human, pig, rat) as well as the methodology (ileal vs fecal, assessment of endogenous losses vs isotopic tracers) lead to variability. This must be carefully considered in the understanding of the PD-CAAS and DIAAS and the comparison between protein sources.

Keywords: Chemical score, reference patterns, digestibility, amino acids

Conflits d'intérêt : aucun

Bibliographie

- [1] Seligson H, Mackey LN. Variable Predictions of Protein Quality by Chemical Score Due to Amino Acid Analysis and Reference Pattern 1984;10. <https://doi.org/10.1093/jn/114.4.682>.
- [2] FAO/WHO Expert Consultation, editor. Protein quality evaluation. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1991.
- [3] Schaafsma G. The Protein Digestibility–Corrected Amino Acid Score. *The Journal of Nutrition* 2000;130:1865S-1867S. <https://doi.org/10.1093/jn/130.7.1865S>.
- [4] FAO Expert Consultation, editor. Dietary protein quality evaluation in human nutrition. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013.
- [5] Gaudichon C, Bos C, Morens C, Petzke KJ, Mariotti F, Everwand J, et al. Ileal losses of nitrogen and amino acids in humans and their importance to the assessment of amino acid requirements. *Gastroenterology* 2002;123:50–9. <https://doi.org/10.1053/gast.2002.34233>.
- [6] Rutherfurd 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;145:372–9. <https://doi.org/10.3945/jn.114.195438>.
- [7] WHO/FAO/UNU Expert Consultation. Protein and amino acid requirements in human nutrition. Geneva: WHO; 2007.
- [8] FAO/WHO/UNU Expert Consultation. Energy and protein requirements. Geneva: 1985.
- [9] Herreman L, Nommensen P, Pennings B, Laus MC. Comprehensive overview of the quality of plant- And animal-sourced proteins based on the digestible indispensable amino acid score. *Food Sci Nutr* 2020;8:5379–91. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1809>.
- [10] Mathai JK, Liu Y, Stein HH. Values for digestible indispensable amino acid scores (DIAAS) for some dairy and plant proteins may better describe protein quality than values calculated using the concept for protein digestibility-corrected amino acid scores (PDCAAS). *British Journal of Nutrition* 2017;117:490–9. <https://doi.org/10.1017/S0007114517000125>.
- [11] Tomé D, Cordella C, Dib O, Péron C. Nitrogen and protein content measurement and nitrogen to protein conversion factors for dairy and soy protein-based foods: a systematic review and modelling analysis. FAO/WHO; 2019.
- [12] Maubois J-L, Lorient D. Dairy proteins and soy proteins in infant foods nitrogen-to-protein conversion factors. *Dairy Sci & Technol* 2016;96:15–25. <https://doi.org/10.1007/s13594-015-0271-0>.
- [13] Mariotti F, Tomé D, Mirand P. Converting Nitrogen into Protein—Beyond 6.25 and Jones’ Factors. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2008;48:177–84. <https://doi.org/10.1080/10408390701279749>.
- [14] U.S. Department of Agriculture. FoodData Central 2019. <https://fdc.nal.usda.gov/> (accessed March 7, 2020).
- [15] Rutherfurd SM, Dunn BM. Quantitative Amino Acid Analysis. In: Coligan JE, Dunn BM, Speicher DW, Wingfield PT, editors. *Current Protocols in Protein Science*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2011, p. 3.2.1-3.2.6. <https://doi.org/10.1002/0471140864.ps0302s63>.
- [16] Hodgkinson SM, Montoya CA, Scholten PT, Rutherfurd SM, Moughan PJ. Cooking Conditions Affect the True Ileal Digestible Amino Acid Content and Digestible

- Indispensable Amino Acid Score (DIAAS) of Bovine Meat as Determined in Pigs. *The Journal of Nutrition* 2018;148:1564–9. <https://doi.org/10.1093/jn/nxy153>.
- [17] Han F, Han F, Wang Y, Fan L, Song G, Chen X, et al. Digestible indispensable amino acid scores of nine cooked cereal grains. *British Journal of Nutrition* 2019;121:30–41. <https://doi.org/10.1017/S0007114518003033>.
- [18] Rowan AM, Moughan PJ, Wilson MN, Maher K, Tasman-Jones C. Comparison of the ileal and faecal digestibility of dietary amino acids in adult humans and evaluation of the pig as a model animal for digestion studies in man. *Br J Nutr* 1994;71:29. <https://doi.org/10.1079/BJN19940108>.
- [19] Oberli M, Marsset-Baglieri A, Airinei G, Santé-Lhoutellier V, Khodorova N, Rémond D, et al. High True Ileal Digestibility but Not Postprandial Utilization of Nitrogen from Bovine Meat Protein in Humans Is Moderately Decreased by High-Temperature, Long-Duration Cooking. *J Nutr* 2015;145:2221–8. <https://doi.org/10.3945/jn.115.216838>.
- [20] Calvez J, Benoit S, Piedcoq J, Khodorova N, Azzout-Marniche D, Tomé D, et al. Very low ileal nitrogen and amino acid digestibility of zein compared to whey protein isolate in healthy volunteers. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2020:nqaa274. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqaa274>.
- [21] Harb WJ. Crohn's Disease of the Colon, Rectum, and Anus. *Surgical Clinics of North America* 2015;95:1195–210. <https://doi.org/10.1016/j.suc.2015.07.005>.
- [22] Fuller M. Determination of protein and amino acid digestibility in foods including implications of gut microbial amino acid synthesis. *British Journal of Nutrition* 2012;108:S238–46. <https://doi.org/10.1017/S0007114512002279>.
- [23] Miller ER, Ullrey DE. The Pig as a Model for Human Nutrition. *Ann Rev Nutr* 1987;7:361–82. <https://doi.org/10.1146/annurev.nu.07.070187.002045>.
- [24] Bailey HM, Stein HH. Raw and roasted pistachio nuts (*PISTACIA VERA* L.) are 'good' sources of protein based on their digestible indispensable amino acid score as determined in pigs. *J Sci Food Agric* 2020;100:3878–85. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10429>.
- [25] Reynaud Y, Buffière C, Cohade B, Vauris M, Liebermann K, Hafnaoui N, et al. True ileal amino acid digestibility and digestible indispensable amino acid scores (DIAASs) of plant-based protein foods. *Food Chemistry* 2021;338:128020. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128020>.
- [26] DeSesso JM, Jacobson CF. Anatomical and physiological parameters affecting gastrointestinal absorption in humans and rats. *Food and Chemical Toxicology* 2001;39:20. [https://doi.org/10.1016/s0278-6915\(00\)00136-8](https://doi.org/10.1016/s0278-6915(00)00136-8).
- [27] Deglaire A, Moughan PJ. Animal models for determining amino acid digestibility in humans – a review. *Br J Nutr* 2012;108:S273–81. <https://doi.org/10.1017/S0007114512002346>.
- [28] Deglaire A, Bos C, Tomé D, Moughan PJ. Ileal digestibility of dietary protein in the growing pig and adult human. *Br J Nutr* 2009;102:1752. <https://doi.org/10.1017/S0007114509991267>.
- [29] Rutherford SM, Moughan PJ. The rat as a model animal for the growing pig in determining ileal amino acid digestibility in soya and milk proteins. *J Anim Physiol Anim Nutr (Berl)* 2003;87:292–300. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0396.2003.00438.x>.
- [30] Bos C, Airinei G, Mariotti F, Benamouzig R, Bérot S, Evrard J, et al. The Poor Digestibility of Rapeseed Protein Is Balanced by Its Very High Metabolic Utilization in Humans. *The Journal of Nutrition* 2007;137:594–600. <https://doi.org/10.1093/jn/137.3.594>.

- [31] Boutry C, Fouillet H, Mariotti F, Blachier F, Tomé D, Bos C. Rapeseed and milk protein exhibit a similar overall nutritional value but marked difference in postprandial regional nitrogen utilization in rats. *Nutr Metab (Lond)* 2011;8:52. <https://doi.org/10.1186/1743-7075-8-52>.
- [32] Lacroix M, Léonil J, Bos C, Henry G, Airinei G, Fauquant J, et al. Heat Markers and Quality Indexes of Industrially Heat-Treated [¹⁵N] Milk Protein Measured in Rats. *J Agric Food Chem* 2006;54:1508–17. <https://doi.org/10.1021/jf051304d>.
- [33] Ma N, Tian Y, Wu Y, Ma X. Contributions of the Interaction Between Dietary Protein and Gut Microbiota to Intestinal Health. *CPPS* 2017;18. <https://doi.org/10.2174/1389203718666170216153505>.
- [34] Davila A-M, Blachier F, Gotteland M, Andriamihaja M, Benetti P-H, Sanz Y, et al. Intestinal luminal nitrogen metabolism: Role of the gut microbiota and consequences for the host. *Pharmacological Research* 2013;68:95–107. <https://doi.org/10.1016/j.phrs.2012.11.005>.
- [35] Darragh AJ, Hodgkinson SM. Quantifying the Digestibility of Dietary Protein. *J Nutr* 2000;130:1850S-1856S. <https://doi.org/10.1093/jn/130.7.1850S>.
- [36] Tessier R, Khodorova N, Calvez J, Kapel R, Quinsac A, Piedcoq J, et al. ¹⁵N and ²H Intrinsic Labeling Demonstrate That Real Digestibility in Rats of Proteins and Amino Acids from Sunflower Protein Isolate Is Almost as High as That of Goat Whey. *J Nutr* 2020;150:450–7. <https://doi.org/10.1093/jn/nxz279>.
- [37] Tessier R, Calvez J, Khodorova N, Gaudichon C. Protein and amino acid digestibility of ¹⁵N Spirulina in rats. *Eur J Nutr* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00394-020-02368-0>.
- [38] Devi S, Varkey A, Sheshshayee MS, Preston T, Kurpad AV. Measurement of protein digestibility in humans by a dual-tracer method. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2018;107:984–91. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqy062>.
- [39] Kashyap S, Varkey A, Shivakumar N, Devi S, Reddy B H R, Thomas T, et al. True ileal digestibility of legumes determined by dual-isotope tracer method in Indian adults. *The American Journal of Clinical Nutrition* 2019;110:873–82. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqz159>.

Liste des figures

Figure 1. Passer de la composition en acides aminés de l'ingrédient à celle de la protéine pure. L'ingrédient contient des protéines et d'autres composants. Pour déterminer la quantité de protéines dans l'ingrédient, on peut soit doser l'azote et utiliser un facteur de conversion, soit calculer la somme massique des acides aminés. La quantité d'acides aminés mesurés dans l'ingrédient est ensuite rapportée à la quantité de protéines ainsi déterminées.

Figure 1: Passer de la composition en AA de l'ingrédient à celle de la protéine pure

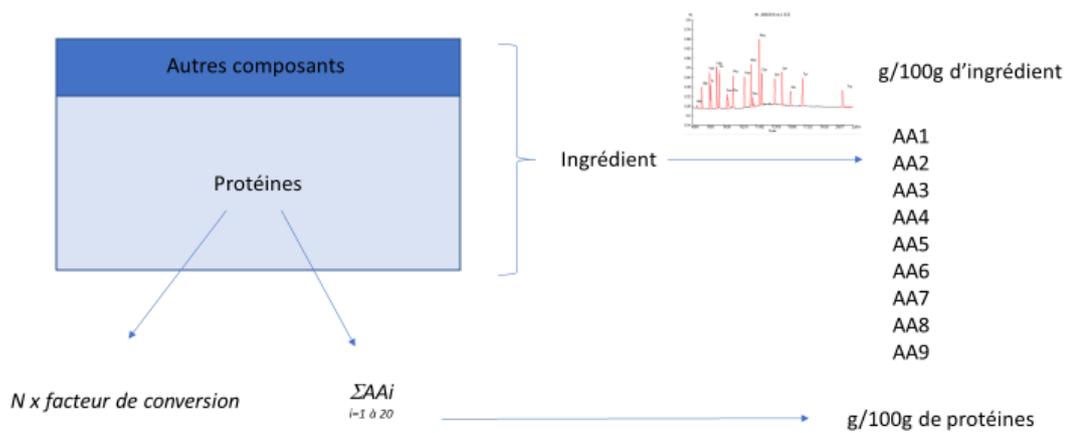


Figure 1. Comparaison des scores chimiques des protéines de lentilles, en fonction de deux facteurs de conversion de l'azote et de l'utilisation du poids moléculaire « en chaîne » ou libre. AAS, acides aminés soufrés (méthionine et cystéine) ; AAA, acides aminés aromatiques (phénylalanine et tyrosine). Valeurs calculées à partir des compositions en acides aminés de l'USDA [14].

