

Rapport Complet sur les Acides Aminés : De la Biochimie Fondamentale à la Nutrition Humaine

Chapitre 1 : Document d'Information

Ce document d'information a pour objectif de synthétiser les connaissances fondamentales et appliquées sur les acides aminés. En tant que piliers de la biochimie et de la physiologie, les acides aminés sont bien plus que de simples composants des protéines ; ils sont au cœur d'une multitude de processus biologiques vitaux. Ce rapport explore leur structure, leur classification, leur rôle central dans la biosynthèse des protéines, ainsi que leurs fonctions étendues en nutrition, en santé et dans diverses applications industrielles. Les chapitres suivants fourniront un guide d'étude pour approfondir ces concepts.

1.1. Résumé Exécutif

Les acides aminés sont les "blocs de construction" fondamentaux dont sont constituées toutes les protéines des organismes vivants. Bien qu'il en existe plus de 500 dans la nature, le code génétique humain n'en code directement que 20, qui sont assemblés en d'innombrables combinaisons pour former la vaste gamme de protéines nécessaires à la vie. La compréhension de ces molécules est essentielle pour de nombreux domaines scientifiques, de la biologie moléculaire à la nutrition clinique.

La classification des acides aminés est double et cruciale. D'un point de vue nutritionnel, ils sont divisés en **essentiels**, que le corps ne peut synthétiser et doit obtenir par l'alimentation, et **non-essentiels**, que le corps peut produire. Certains sont **conditionnellement essentiels**, devenant nécessaires en période de maladie ou de stress. D'un point de vue chimique, ils sont classés selon les propriétés physico-chimiques de leur chaîne latérale (groupe R), ce qui détermine leur charge, leur polarité et leur taille, et influence directement la structure tridimensionnelle et la fonction de la protéine finale.

Le rôle le plus connu des acides aminés est leur participation à la biosynthèse des protéines, un processus dicté par le code génétique. Sur le ribosome, les séquences de trois nucléotides, appelées codons, sur l'ARN messager (ARNm) spécifient l'ordre dans lequel les acides aminés doivent être assemblés pour former une chaîne polypeptidique. Ce mécanisme complexe et précis est à la base de l'expression de toute l'information génétique.

Au-delà de leur rôle structurel, les acides aminés sont indispensables à la santé humaine. Les besoins nutritionnels varient considérablement en fonction de l'âge, de l'état physiologique (comme la grossesse) et de l'état de santé. Ils servent également de précurseurs à de nombreuses molécules biologiquement actives, telles que les neurotransmetteurs et les hormones. Leurs applications industrielles sont également vastes, allant des additifs alimentaires pour les humains et les animaux aux précurseurs pour la synthèse de plastiques biodégradables.

1.2. Fondamentaux des Acides Aminés

Pour saisir la fonction des acides aminés dans les systèmes biologiques, il est impératif de comprendre leur structure de base. C'est cette structure qui leur confère leurs propriétés uniques et leur permet de s'assembler en des polymères complexes et fonctionnels.

1.2.1. Définition et Structure Générale



Un **acide aminé** est un composé organique qui contient à la fois un groupe fonctionnel amine ($-NH_2$) et un groupe fonctionnel acide carboxylique ($-COOH$). Bien qu'il existe plus de 500 acides aminés dans la nature, les protéines sont construites à partir de seulement 22 d'entre eux, dont 20 sont directement codés par le code génétique universel.

La structure de base d'un **α -amino-acide**, la forme la plus courante, est constituée de :

- Un atome de carbone central, appelé **carbone alpha (α)**.
- Un **groupe amino** ($-NH_2$) lié au carbone alpha.
- Un **groupe carboxyle** ($-COOH$) lié au carbone alpha.
- Un atome d'hydrogène (H) lié au carbone alpha.
- Une **chaîne latérale organique** (ou groupe R) qui est également liée au carbone alpha.

C'est la chaîne latérale R qui distingue les 20 acides aminés courants les uns des autres, leur conférant des propriétés physico-chimiques uniques qui dictent leur rôle dans la structure et la fonction des protéines.

1.2.2. Zwitterions et Chiralité

- **Zwitterion** : Il est crucial de comprendre que les acides aminés n'existent pas sous la forme "neutre" ($-NH_2$ et $-COOH$) souvent représentée dans les schémas de base pour des raisons de simplicité pédagogique. En réalité, en solution aqueuse à un pH proche de la neutralité (comme le pH physiologique), les acides aminés existent principalement sous forme d'ions dipolaires appelés **zwitterions**. Dans cette forme biologiquement pertinente, le groupe amino est protoné ($-NH_3^+$) et le groupe carboxyle est déprotoné ($-COO^-$). Bien que la charge nette de la molécule soit nulle, elle possède des charges positives et négatives distinctes, ce qui est fondamental pour ses propriétés.
- **Chiralité** : À l'exception de la glycine (dont la chaîne latérale est un simple atome d'hydrogène), le carbone alpha de tous les acides aminés protéinogènes est un centre stéréogène ou chiral. Cela signifie qu'il peut exister sous deux formes énantiomériques (images miroir non superposables), désignées par les configurations L ("lévogyre") et D ("dextrogyre"). Tous les acides aminés incorporés dans les protéines par les ribosomes ont la **configuration L**. Quelques acides aminés D existent dans la nature, notamment dans les parois cellulaires bactériennes et comme neuromodulateurs.

1.3. Classification des Acides Aminés

La classification des acides aminés selon différents critères est essentielle pour comprendre leur diversité fonctionnelle en biochimie, nutrition et médecine. Chaque système de classification offre un aperçu différent de leur rôle, qu'il s'agisse de leur nécessité dans l'alimentation ou de leur contribution à l'architecture des protéines.

1.3.1. Classification Nutritionnelle

Cette classification, fondamentale pour la nutrition humaine, se base sur la capacité du corps à synthétiser chaque acide aminé.



- **Acides Aminés Essentiels** : Ce sont les acides aminés que le corps humain ne peut pas synthétiser en quantité suffisante pour répondre à ses besoins. Ils doivent donc être obtenus impérativement par l'alimentation.
- **Acides Aminés Non-Essentiels** : Ce sont ceux que le corps est capable de synthétiser lui-même.
- **Acides Aminés Conditionnellement Essentiels** : Cette sous-catégorie d'acides aminés non essentiels peut devenir essentielle dans certaines conditions physiologiques, comme lors d'une maladie ou d'un stress intense, lorsque la capacité de synthèse du corps est dépassée par ses besoins.

Le corps ne peut pas stocker les acides aminés. Par conséquent, l'absence d'un seul acide aminé essentiel dans l'alimentation interrompt la synthèse de toute protéine le requérant au niveau du ribosome. Cela provoque la libération et le catabolisme des autres acides aminés de la chaîne en cours de formation, ce qui peut avoir de graves conséquences sur la santé.

Catégorie	Acides Aminés
Essentiel	Histidine, Isoleucine, Leucine, Lysine, Méthionine, Phénylalanine, Thréonine, Tryptophane, Valine
Non-Essentiel	Alanine, Arginine, Asparagine, Acide aspartique, Cystéine, Acide glutamique, Glutamine, Glycine, Proline, Sérine, Tyrosine
Conditionnellement essentiel	Arginine, Cystéine, Glutamine, Glycine, Proline, Tyrosine

1.3.2. Classification Basée sur les Propriétés des Chaînes Latérales

Les propriétés physico-chimiques des chaînes latérales (R) déterminent la structure tridimensionnelle et la fonction des protéines.

- **Chaînes latérales polaires chargées** :
 - *Acides (charge négative)* : Acide aspartique et Acide glutamique. Leurs chaînes latérales contiennent un groupe carboxyle qui est déprotoné à pH physiologique.
 - *Basiques (charge positive)* : Lysine, Arginine et Histidine. Leurs chaînes latérales contiennent des groupes aminés qui sont protonés à pH physiologique.
 - *Rôle* : Ces résidus se trouvent souvent à la surface des protéines solubles et sont cruciaux pour la formation de **ponts salins** (interactions électrostatiques) qui stabilisent la structure des protéines.
- **Chaînes latérales polaires non chargées** :
 - *Exemples* : Sérine, Thréonine, Asparagine, Glutamine.
 - *Rôle* : Ces chaînes latérales peuvent former des **liaisons hydrogène** avec l'eau ou d'autres résidus, ce qui les rend hydrophiles et les positionne souvent à la surface



des protéines. Elles sont importantes pour les interactions et la catalyse enzymatique.

- **Chaînes latérales hydrophobes :**
 - *Aliphatiques* : Alanine, Valine, Leucine, Isoleucine.
 - *Aromatiques* : Phénylalanine, Tryptophane, Tyrosine (la tyrosine a aussi un caractère polaire dû à son groupe hydroxyle).
 - *Rôle* : Ces chaînes latérales évitent le contact avec l'eau. Dans les protéines globulaires, elles sont le principal moteur du **repliement des protéines**, tendant à se regrouper au cœur de la structure pour former un noyau hydrophobe.
- **Cas spéciaux :**
 - **Glycine** : Sa chaîne latérale est un simple atome d'hydrogène. Sa petite taille lui confère une flexibilité conformationnelle unique, lui permettant de se loger dans des espaces restreints de la structure protéique.
 - **Proline** : Sa chaîne latérale est cyclique et se lie à la fois au carbone alpha et à l'atome d'azote du groupe amino, créant une structure rigide. Elle introduit des "coudes" ou des "plis" dans les chaînes polypeptidiques, limitant la flexibilité locale.
 - **Cystéine** : Elle contient un groupe thiol (-SH) qui peut s'oxyder pour former un **pont disulfure** covalent avec une autre cystéine. Ces ponts sont essentiels pour stabiliser la structure de nombreuses protéines, notamment les anticorps et les protéines sécrétées.

1.3.3. Classification Biochimique

Cette classification se concentre sur l'incorporation des acides aminés dans les protéines et est directement liée aux propriétés chimiques décrites précédemment ; ce sont ces propriétés qui rendent les 20 acides aminés standards adaptés à la traduction ribosomale.

- **Protéinogène vs. Non-protéinogène :**
 - Un acide aminé **protéinogène** est un acide aminé qui est incorporé dans les protéines lors de la traduction par les ribosomes.
 - Un acide aminé **non-protéinogène** n'est pas incorporé dans les protéines par la machinerie de traduction standard. Il peut toutefois avoir des rôles biologiques importants, comme le GABA (acide γ -aminobutyrique), un neurotransmetteur.
- **Standard vs. Non-standard :**
 - Les 20 acides aminés **standards** sont ceux qui sont directement codés par les codons du code génétique universel.
 - Les acides aminés **non-standards** sont également protéinogènes mais sont incorporés par des mécanismes de traduction spéciaux. Les deux exemples principaux sont la **sélénocystéine** (souvent appelée le 21^e acide aminé) et la



pyrrolysine (le 22e), qui sont codées par des codons "stop" en présence de séquences d'ARN spécifiques.

- **Modifications Post-Traductionnelles (MPT)** : De nombreux acides aminés non-protéinogènes trouvés *dans* les protéines sont en fait des résidus d'acides aminés standards qui ont été modifiés chimiquement *après* la synthèse de la protéine. Par exemple, l'hydroxyproline, un composant majeur du collagène, est formée par l'hydroxylation d'un résidu de proline après sa traduction.

1.4. Le Rôle Central dans la Biosynthèse des Protéines

La fonction la plus connue des acides aminés est de servir de monomères pour la construction des protéines. Ce processus fondamental, appelé traduction, est dicté par le code génétique et réalisé par des machines moléculaires complexes, les ribosomes, qui assemblent les acides aminés dans un ordre précis pour former des chaînes polypeptidiques fonctionnelles.

1.4.1. La Liaison Peptidique

La **liaison peptidique** est la liaison covalente qui unit les acides aminés entre eux pour former une chaîne. Elle se forme par une réaction de condensation (ou déshydratation) entre le groupe carboxyle (-COOH) d'un acide aminé et le groupe amino (-NH₂) de l'acide aminé suivant. Au cours de cette réaction, une molécule d'eau (H₂O) est éliminée.

Dans les cellules, ce processus n'est pas direct. Chaque acide aminé est d'abord "activé" en étant attaché à une molécule d'ARN de transfert (ARNt) spécifique. C'est cet aminoacyl-ARNt qui sert de substrat au ribosome. Le ribosome catalyse alors l'attaque du groupe amino de l'aminoacyl-ARNt entrant sur la chaîne polypeptidique en croissance, formant ainsi une nouvelle liaison peptidique.

1.4.2. Le Code Génétique et la Traduction

Le **code génétique** est l'ensemble des règles qui permettent à une cellule de traduire l'information contenue dans une séquence de nucléotides (ADN ou ARNm) en une séquence d'acides aminés.

- **Codon** : L'unité de base du code génétique est le **codon**, un triplet de nucléotides consécutifs sur la molécule d'ARNm. Chaque codon spécifie un acide aminé particulier. Par exemple, le codon UUU sur l'ARNm code pour la phénylalanine.
- **Codons d'initiation et de terminaison** : Le processus de traduction commence généralement au codon d'initiation **AUG** (qui code pour la méthionine) et se termine lorsqu'un des trois codons de terminaison (**UAA**, **UAG** ou **UGA**) est rencontré. Ces derniers ne codent pour aucun acide aminé et signalent la libération de la protéine achevée.
- **Dégénérescence du code** : Le code génétique est dit **dégénéré** ou redondant. Cela signifie que plusieurs codons peuvent coder pour le même acide aminé. Par exemple, la leucine est codée par six codons différents (UUA, UUG, CUU, CUC, CUA, CUG). Cependant, le code n'est pas ambigu : un codon donné ne spécifie jamais plus d'un acide aminé. Cette redondance offre une certaine protection contre les mutations.

1.4.3. Nomenclature et Symboles



Étant donné que les protéines peuvent être des molécules extrêmement grandes, composées de centaines ou de milliers d'acides aminés, il est nécessaire d'utiliser des abréviations pour représenter leurs séquences de manière concise.

- **Code à trois lettres** : C'est le système le plus ancien, où chaque acide aminé est représenté par une abréviation de trois lettres (par exemple, *Ala* pour Alanine, *Gly* pour Glycine).
- **Code à une lettre** : Un système plus compact où chaque acide aminé est représenté par une seule lettre (par exemple, A pour Alanine, G pour Glycine). Ce système a été développé par le Dr. Margaret Oakley Dayhoff, une pionnière dans le domaine de la bio-informatique. L'objectif initial était de réduire la taille des fichiers de données nécessaires pour décrire les séquences de protéines, à une époque où les ressources informatiques étaient limitées.

1.5. Au-delà des Protéines : Fonctions Biologiques et Modifications

Bien que leur rôle de bâtisseurs de protéines soit central, les fonctions des acides aminés s'étendent bien au-delà. Ils sont impliqués dans de nombreux processus métaboliques et régulateurs cruciaux pour le fonctionnement de l'organisme.

1.5.1. Fonctions Non-Protéiques

De nombreux acides aminés servent de précurseurs à d'autres molécules biologiquement importantes, jouant des rôles vitaux dans la signalisation cellulaire, le métabolisme et la neurotransmission.

- **Tryptophane** : C'est le précurseur du neurotransmetteur **sérotonine**, qui régule l'humeur, le sommeil et l'appétit.
- **Tyrosine / Phénylalanine** : Ces acides aminés sont les précurseurs des **catécholamines**, une famille de neurotransmetteurs et d'hormones qui inclut la **dopamine**, l'**épinéphrine** (adrénaline) et la **norépinéphrine** (noradrénaline).
- **Glycine** : Elle est un précurseur des **porphyrines**, des molécules complexes dont la plus connue est l'**hème**, le composant de l'hémoglobine qui transporte l'oxygène.
- **Arginine** : C'est le précurseur de l'**oxyde nitrique (NO)**, une molécule de signalisation impliquée dans la vasodilatation et de nombreuses autres fonctions physiologiques.
- **Acides aminés non-protéinogènes** : Certains acides aminés non utilisés pour la synthèse des protéines ont des fonctions directes. Par exemple, l'**acide gamma-aminobutyrique (GABA)** est un neurotransmetteur inhibiteur majeur dans le système nerveux central.

1.5.2. Modifications Post-Traductionnelles (MPT)

Les **modifications post-traductionnelles (MPT)** sont des modifications chimiques qui surviennent sur les chaînes latérales des acides aminés d'une protéine *après* sa biosynthèse par le ribosome. Ces modifications augmentent considérablement la diversité fonctionnelle du protéome, permettant à un nombre limité de gènes de produire une variété beaucoup plus grande de protéines fonctionnelles. Les MPT sont souvent des mécanismes de régulation dynamiques et réversibles.

- **Phosphorylation** : L'ajout d'un groupe phosphate, le plus souvent sur des résidus de sérine, thréonine ou tyrosine. C'est un mécanisme de régulation réversible crucial dans



d'innombrables processus cellulaires, agissant comme un interrupteur moléculaire pour activer ou désactiver des protéines.

- **Acétylation** : L'ajout d'un groupe acétyle, principalement sur le groupe ϵ -amino de la lysine. Elle joue un rôle majeur dans la régulation de l'expression des gènes via la modification des histones et affecte la stabilité et les interactions des protéines.
- **Glycosylation** : L'ajout de chaînes de sucres (oligosaccharides) à des résidus d'asparagine (N-glycosylation) ou de sérine/thréonine (O-glycosylation). Elle est essentielle pour le repliement correct des protéines, leur stabilité, leur localisation et les interactions cellule-cellule.
- **Ubiquitylation** : L'ajout d'une petite protéine, l'ubiquitine, à un résidu de lysine. L'ubiquitylation peut marquer une protéine pour la dégradation par le protéasome, mais elle peut aussi réguler la signalisation, la réparation de l'ADN et le trafic intracellulaire.

1.6. Nutrition, Santé et Applications Industrielles

La compréhension biochimique des acides aminés a des implications directes et profondes qui se traduisent par des applications pratiques en nutrition humaine, en santé publique et dans divers secteurs industriels.

1.6.1. Besoins Nutritionnels Humains

Les recommandations nutritionnelles actuelles, telles que les *Dietary Reference Intakes* (DRI) ou celles de la FAO/WHO/UNU, sont principalement basées sur des données obtenues chez de jeunes hommes adultes. Cependant, la recherche a montré que les besoins en acides aminés ne sont pas statiques et varient considérablement. La méthode de l'**Oxydation de l'Acide Aminé Indicateur (IAAO)**, une technique isotopique peu invasive, a permis d'étudier plus précisément les besoins de populations vulnérables.

Les besoins en acides aminés varient en fonction de plusieurs facteurs :

- **L'âge** : Les enfants en croissance et les personnes âgées (>60 ans) ont des besoins spécifiques, souvent plus élevés que ceux des jeunes adultes, pour soutenir respectivement la croissance et contrer la perte de masse musculaire liée à l'âge.
- **L'état physiologique** : La grossesse est une période de demande métabolique intense. Les besoins en protéines et en certains acides aminés augmentent, en particulier durant les stades tardifs de la gestation, pour soutenir le développement fœtal et placentaire.
- **L'état de santé** : Des conditions pathologiques comme les maladies hépatiques, les maladies rénales ou la malnutrition modifient profondément le métabolisme des acides aminés, créant des besoins spécifiques qui doivent être pris en compte dans la prise en charge clinique.

1.6.2. Acides Aminés Ramifiés (BCAA) et Supplémentation

Les **acides aminés à chaîne ramifiée (BCAA)** sont un groupe de trois acides aminés essentiels : la **Leucine**, l'**Isoleucine** et la **Valine**. Ils sont populaires sous forme de suppléments, en particulier dans le milieu sportif.

- **Bénéfices potentiels** : La recherche suggère que la supplémentation en BCAA pourrait aider à améliorer la performance sportive, favoriser la croissance musculaire et réduire



les dommages musculaires et la fatigue liés à l'exercice. La leucine, en particulier, semble jouer un rôle clé dans la stimulation de la synthèse des protéines musculaires.

- **Risques et préoccupations :** Cependant, il convient d'être prudent. Des niveaux élevés de BCAA dans le sang ont été observés en corrélation avec un risque accru de certaines maladies. Des études ont montré que des concentrations élevées de BCAA peuvent être des marqueurs de résistance à l'insuline, de diabète de type 2, de maladies hépatiques non alcooliques et de maladies cardiaques. Il est donc crucial d'utiliser ces suppléments avec prudence.

1.6.3. Applications Industrielles

Les acides aminés sont des produits de base précieux dans de nombreuses industries, bien au-delà de la nutrition et de la pharmacologie.

- **Alimentation animale :** La lysine, la méthionine et la thréonine sont couramment ajoutées aux aliments pour animaux (comme le soja) pour compenser les carences en ces acides aminés essentiels et optimiser la croissance du bétail.
- **Industrie alimentaire humaine :**
 - L'**acide glutamique** (sous forme de glutamate monosodique, MSG) est largement utilisé comme exhausteur de goût.
 - L'**aspartame**, un dipeptide composé d'aspartate et de phénylalanine, est un édulcorant artificiel intense.
- **Blocs de construction chimiques :** En tant que molécules chirales pures, les acides aminés sont des matières premières de choix pour la synthèse chirale de produits pharmaceutiques et chimiques complexes.
- **Usages potentiels :** La recherche explore l'utilisation des acides aminés comme composants pour des **engrais** plus efficaces et pour la fabrication de **plastiques biodégradables**, offrant des alternatives écologiques aux produits pétrochimiques.

Chapitre 2 : Guide d'Étude

Ce chapitre est conçu comme un outil pour vous aider à consolider et à approfondir votre compréhension des concepts clés présentés dans le document d'information. Considérez-le comme un assistant de recherche personnel qui vous guidera à travers les aspects fondamentaux des acides aminés, vous mettant au défi de tester vos connaissances et d'explorer les sujets plus en profondeur. L'objectif est de transformer l'information en savoir durable. Après avoir exploré ces exercices, la section Foire Aux Questions vous attend pour répondre aux interrogations les plus courantes.

2.1. Quiz de Connaissances (Questions à Réponse Courte)

1. Quelle est la différence fondamentale entre un acide aminé essentiel et un acide aminé non-essentiel ?
2. Décrivez la structure de base partagée par les 20 α -amino-acides protéinogènes.



3. Qu'est-ce qu'un zwitterion et pourquoi cette forme est-elle prédominante pour les acides aminés en solution aqueuse ?
4. Expliquez brièvement l'origine et l'utilité du code à une lettre pour les acides aminés.
5. Quel est le rôle de la liaison peptidique dans la formation des protéines ?
6. Définissez la "dégénérescence" du code génétique et donnez un exemple.
7. Citez deux fonctions biologiques des acides aminés qui ne sont pas liées à la construction de protéines.
8. Que sont les modifications post-traductionnelles (MPT) et quel est leur impact sur les protéines ?
9. Qu'est-ce que les BCAA et quel est un de leurs bénéfices potentiels dans le contexte de l'exercice physique ?
10. Pourquoi les besoins en acides aminés varient-ils au cours de la vie, par exemple pendant la grossesse ?

2.2. Corrigé du Quiz

1. Un acide aminé essentiel ne peut pas être synthétisé par le corps humain et doit donc être obtenu par l'alimentation. En revanche, un acide aminé non-essentiel peut être produit par le corps à partir d'autres composés.
2. La structure de base partagée comprend un atome de carbone central (carbone alpha) lié à un groupe amino ($-NH_2$), un groupe carboxyle ($-COOH$), un atome d'hydrogène (H) et une chaîne latérale organique (groupe R) qui est unique à chaque acide aminé.
3. Un zwitterion est un ion dipolaire. À pH neutre, le groupe amino d'un acide aminé est protoné ($-NH_3^+$) et le groupe carboxyle est déprotoné ($-COO^-$), créant une molécule avec des charges positives et négatives mais une charge nette nulle, ce qui est sa forme prédominante en solution.
4. Le code à une lettre a été développé par le Dr. Margaret Oakley Dayhoff pour réduire la taille des fichiers de données décrivant les séquences de protéines, une nécessité à l'époque des débuts de la bio-informatique. Il permet une représentation plus compacte des longues chaînes polypeptidiques.
5. La liaison peptidique est une liaison covalente formée entre le groupe carboxyle d'un acide aminé et le groupe amino d'un autre. C'est le lien fondamental qui unit les acides aminés en une chaîne linéaire pour former des peptides et des protéines.
6. La dégénérescence du code génétique signifie que plusieurs codons (triplets de nucléotides) peuvent coder pour le même acide aminé. Par exemple, la leucine est spécifiée par six codons différents (ex: UUA, UUG), mais le code reste non ambigu car chaque codon ne code que pour un seul acide aminé.
7. Certains acides aminés sont des précurseurs de neurotransmetteurs (le tryptophane pour la sérotonine) et d'hormones (la tyrosine pour les catécholamines). D'autres, comme la glycine, sont des précurseurs de molécules comme l'hème de l'hémoglobine.



8. Les MPT sont des modifications chimiques des chaînes latérales des acides aminés qui se produisent après la synthèse d'une protéine. Elles augmentent considérablement la diversité fonctionnelle des protéines, régulant leur activité, leur localisation et leurs interactions.
9. Les BCAA (acides aminés à chaîne ramifiée) sont la leucine, l'isoleucine et la valine. Un bénéfice potentiel de leur supplémentation est qu'ils peuvent améliorer la performance à l'exercice et réduire les dommages musculaires et la fatigue.
10. Les besoins en acides aminés varient car la demande métabolique du corps change. Pendant la grossesse, par exemple, les besoins augmentent, en particulier à un stade avancé, pour soutenir la croissance du fœtus, du placenta et des tissus maternels.

2.3. Questions de Réflexion (Format Essai)

1. Analysez les différentes manières de classer les acides aminés (nutritionnelle, chimique, biochimique). Expliquez en quoi chaque système de classification est pertinent pour comprendre la biologie des protéines et la santé humaine.
2. Décrivez le processus de la biosynthèse des protéines, de la lecture de l'ARNm par le ribosome à la formation d'une chaîne polypeptidique. Mettez en évidence les rôles du codon, de l'ARNt et du centre peptidyl transférase du ribosome.
3. Discutez de l'importance des acides aminés au-delà de leur rôle de simples "briques". Explorez leurs fonctions en tant que précurseurs métaboliques et l'impact des modifications post-traductionnelles sur la régulation cellulaire.
4. Évaluez de manière critique l'utilisation des suppléments de BCAA. En vous basant sur les textes fournis, exposez les arguments en faveur de leurs bénéfices et les préoccupations concernant leurs risques potentiels.
5. Expliquez pourquoi une approche unique pour définir les besoins en protéines et en acides aminés est insuffisante pour la population humaine. Utilisez les exemples des enfants, des femmes enceintes et des personnes âgées pour illustrer votre argumentation.

2.4. Glossaire des Termes Clés

- **Acide Aminé** : Un composé organique contenant à la fois un groupe fonctionnel amine ($-NH_2$) et un groupe acide carboxylique ($-COOH$). Ils sont les blocs de construction des protéines.
- **Acide Aminé Essentiel** : Un acide aminé que le corps humain ne peut pas synthétiser et doit donc obtenir par l'alimentation.
- **Acide Aminé Non-Protéinogène** : Un acide aminé qui n'est pas naturellement incorporé dans les protéines par le mécanisme de traduction standard des ribosomes.
- **BCAA (Branched-Chain Amino Acids)** : Acides aminés à chaîne ramifiée, un groupe de trois acides aminés essentiels (leucine, isoleucine et valine).
- **Chiralité** : La propriété d'un objet (comme une molécule) de ne pas être superposable à son image dans un miroir. Tous les acides aminés protéinogènes, sauf la glycine, sont chiraux.



- **Code Génétique** : L'ensemble des règles utilisées par les cellules vivantes pour traduire l'information codée dans le matériel génétique (séquences d'ADN ou d'ARN) en protéines.
 - **Codon** : Une séquence de trois nucléotides consécutifs dans l'ADN ou l'ARNm qui spécifie un acide aminé particulier ou signale la fin de la traduction.
 - **IAAO (Indicator Amino Acid Oxidation)** : Oxydation de l'Acide Aminé Indicateur ; une méthode isotopique peu invasive utilisée pour déterminer les besoins en acides aminés chez l'homme.
 - **Liaison Peptidique** : Une liaison amide covalente formée entre deux acides aminés lors d'une réaction de condensation, créant la chaîne polypeptidique d'une protéine.
 - **Modification Post-Traductionnelle (MPT)** : Une modification chimique d'une protéine après sa synthèse par le ribosome, qui modifie sa fonction, sa localisation ou sa stabilité.
 - **Protéinogène** : Qualifie un acide aminé qui est incorporé dans les protéines lors de la traduction.
 - **Traduction (biologie)** : Le processus par lequel l'information génétique portée par un ARNm est décodée par un ribosome pour produire une séquence spécifique d'acides aminés, formant une protéine.
 - **Zwitterion** : Une molécule qui contient un nombre égal de groupes fonctionnels chargés positivement et négativement, résultant en une charge nette nulle. Les acides aminés existent sous cette forme à pH physiologique.
-

Chapitre 3 : Foire Aux Questions (FAQ)

Cette section est conçue pour répondre aux dix questions les plus importantes que l'on pourrait se poser sur les acides aminés. Les réponses fournies sont claires, directes et entièrement basées sur les informations synthétisées dans ce rapport, afin d'offrir un résumé pratique et accessible des points clés. Après cette foire aux questions, nous remonterons le temps avec une chronologie des découvertes majeures dans ce domaine fascinant.

3.1. Questions et Réponses

1. Combien d'acides aminés existe-t-il, et pourquoi se concentre-t-on principalement sur 20 d'entre eux ? Il existe plus de 500 acides aminés différents dans la nature. Cependant, nous nous concentrons principalement sur un groupe de 20 (parfois étendu à 22) car ce sont les seuls que le code génétique humain code directement pour être utilisés comme blocs de construction de toutes les protéines du corps. Ces 20 acides aminés "standards" sont les monomères assemblés par les ribosomes pour former les chaînes polypeptidiques.

2. Le corps peut-il stocker les acides aminés comme il stocke les graisses ? Non. Contrairement aux graisses (sous forme de triglycérides) et aux glucides (sous forme de glycogène ou d'amidon), le corps ne possède pas de mécanisme de stockage pour les acides aminés. Cela signifie qu'un apport régulier et quotidien en acides aminés essentiels via l'alimentation est crucial pour maintenir la synthèse des protéines et les fonctions corporelles.



3. Que se passe-t-il si l'on ne consomme pas assez d'acides aminés essentiels ? Une carence en un ou plusieurs acides aminés essentiels entraîne l'inhibition de la synthèse des protéines. Étant donné que le corps ne peut pas stocker ces molécules, l'absence d'un seul "bloc" essentiel met un terme à la construction de toutes les protéines qui le nécessitent. Cela peut conduire à un large éventail d'effets néfastes sur la santé, affectant la croissance, la réparation des tissus, la fonction immunitaire et bien d'autres processus vitaux.

4. Les suppléments de BCAA sont-ils sûrs et efficaces ? La réponse est nuancée. D'une part, certaines études suggèrent que les suppléments de BCAA (leucine, isoleucine, valine) peuvent être efficaces pour améliorer la performance sportive, augmenter la masse musculaire et réduire les dommages musculaires liés à l'exercice. D'autre part, des niveaux élevés de BCAA dans le sang ont été observés en corrélation avec un risque accru de certaines maladies, notamment le diabète de type 2, les problèmes hépatiques et les maladies cardiaques. Leur utilisation doit donc être considérée avec prudence.

5. Comment les scientifiques déterminent-ils les besoins journaliers en acides aminés ? Historiquement, la méthode du **bilan azoté** était utilisée. Elle consistait à mesurer la différence entre l'azote ingéré et l'azote excrété pour estimer les besoins. Aujourd'hui, une méthode plus moderne, précise et moins invasive est privilégiée : l'**Oxydation de l'Acide Aminé Indicateur (IAAO)**. Cette technique utilise des isotopes stables pour suivre le métabolisme d'un acide aminé "indicateur" et déterminer le point auquel les besoins pour un autre acide aminé "test" sont satisfaits.

6. Quelle est la différence entre un acide aminé "standard" et "non-standard" ? Les 20 acides aminés **standards** sont ceux directement codés par les codons du code génétique universel. Les acides aminés **non-standards**, comme la sélénocystéine et la pyrrolysine, sont également incorporés dans les protéines (ils sont donc protéinogènes) mais par des mécanismes de traduction uniques et rares. Par exemple, la sélénocystéine est codée par un codon UGA (normalement un codon stop) en présence d'une séquence spécifique sur l'ARNm.

7. Qu'est-ce que la phosphorylation et pourquoi est-ce une modification importante ? La phosphorylation est une modification post-traductionnelle qui consiste en l'ajout d'un groupe phosphate sur un acide aminé (généralement la sérine, la thréonine ou la tyrosine). C'est un mécanisme de régulation réversible extrêmement important, agissant comme un interrupteur moléculaire qui peut activer, désactiver ou moduler la fonction d'innombrables protéines. Elle joue un rôle crucial dans la quasi-totalité des processus cellulaires.

8. Existe-t-il des exceptions au code génétique "universel" ? Oui. Bien que le code génétique soit remarquablement conservé à travers toutes les formes de vie, des variantes mineures existent. Par exemple, le code génétique utilisé par les mitochondries humaines diffère légèrement du code nucléaire standard. D'autres variations ont été observées chez certaines levures ou d'autres organismes, où certains codons peuvent avoir une signification différente.

9. Les sources de protéines végétales sont-elles aussi "bonnes" que les sources animales ? Les protéines animales sont généralement considérées comme "complètes" car elles fournissent tous les acides aminés essentiels dans des proportions adéquates pour les besoins humains. De nombreuses sources de protéines végétales, en revanche, peuvent être déficientes en un ou plusieurs acides aminés essentiels (c'est ce qu'on appelle l'**acide aminé limitant**). Cependant, en combinant différentes sources végétales, il est tout à fait possible d'obtenir un profil complet d'acides aminés essentiels.



10. Quelles sont les utilisations des acides aminés en dehors de la nutrition ? Les acides aminés ont de nombreuses applications industrielles. Parmi les plus courantes, on trouve leur utilisation comme exhausteurs de goût (le glutamate monosodique ou MSG), édulcorants artificiels (l'aspartame), additifs dans l'alimentation animale pour optimiser la croissance, et comme précurseurs dans la synthèse chimique de produits pharmaceutiques. Des applications plus récentes incluent leur utilisation potentielle dans la fabrication d'engrais et de plastiques biodégradables.

Chapitre 4 : Chronologie des Découvertes Clés

Ce chapitre retrace les étapes historiques majeures qui ont façonné notre compréhension actuelle des acides aminés. De la première isolation d'une substance inconnue dans du jus d'asperge à la résolution complète du code génétique, chaque découverte a constitué une pierre angulaire, nous rapprochant un peu plus des secrets fondamentaux de la vie. Ce parcours historique met en lumière le processus cumulatif de la science, aboutissant aux connaissances détaillées compilées dans ce rapport.

4.1. Repères Historiques

- **1806** : Les chimistes français Louis-Nicolas Vauquelin et Pierre Jean Robiquet isolent un composé du jus d'asperge, qu'ils nomment **asparagine**. C'est le tout premier acide aminé à être découvert.
- **1810** : Découverte de la **cystine**.
- **1820** : Découverte de la **glycine** et de la **leucine**.
- **1865** : Le chimiste Adolphe Wurtz reconnaît que ces composés forment une catégorie chimique unifiée, bien qu'il ne lui donne pas de nom spécifique.
- **1884** : Découverte de la **cystéine**, le monomère qui compose la cystine.
- **1898** : Le terme "**amino acid**" est utilisé pour la première fois en anglais.
- **1902** : Emil Fischer et Franz Hofmeister proposent indépendamment l'hypothèse révolutionnaire que les protéines sont de longues chaînes d'acides aminés reliés par des liaisons qu'ils nomment "**liaisons peptidiques**".
- **1935** : William Cumming Rose découvre la **thréonine**, le dernier des 20 acides aminés courants à être identifié. Ses travaux permettent également de déterminer quels sont les acides aminés **essentiels** pour la croissance humaine.
- **1953** : La découverte de la structure en double hélice de l'ADN par Watson et Crick lance la course pour comprendre comment l'information génétique est utilisée pour coder les protéines.
- **Milieu du 20e siècle** : Le Dr. Margaret Oakley Dayhoff développe le **code à une lettre** pour les acides aminés, une innovation cruciale pour le domaine naissant de la bio-informatique, permettant de stocker et d'analyser les séquences de protéines de manière efficace.



- **1961** : Marshall Nirenberg et Heinrich Matthaei réalisent une expérience décisive montrant que le codon **UUU** code pour l'acide aminé phénylalanine. C'est la première lettre du code génétique à être déchiffrée.
- **Années 1960** : Le reste du code génétique est rapidement déchiffré grâce aux travaux de Har Gobind Khorana, Robert W. Holley, ainsi qu'aux efforts continus de Nirenberg et Philip Leder, leur valant collectivement le prix Nobel.

Chapitre 5 : Liste des Sources

Cette section fournit une liste bibliographique complète des sources qui ont servi de fondement à la compilation des informations contenues dans ce rapport. Chaque référence est formatée selon les conventions des publications scientifiques afin d'assurer la traçabilité et la crédibilité des données présentées.

5.1. Bibliographie

- Adoga, G. I., & Nicholson, B. H. (1988). Letters to the editor. *Biochemical Education*, 16(1), 49.
- Aitken, A., Cohen, P., Santikarn, S., et al. (1982). Identification of the NH₂-terminal blocking group of calcineurin B as myristic acid. *FEBS Lett.*, 150, 314–318.
- Alexander, L., & Grierson, D. (2002). Ethylene biosynthesis and action in tomato: a model for climacteric fruit ripening. *Journal of Experimental Botany*, 53(377), 2039–2055.
- Allfrey, V.G., Faulkner, R., & Mirsky, A. (1964). Acetylation and methylation of histones and their possible role in the regulation of RNA synthesis. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 51, 786.
- Al-Mokbel, A., Courtney-Martin, G., Elango, R., Ball, R. O., Pencharz, P. B., & Tomlinson, C. (2019). Tryptophan requirement in school-age children determined by the Indicator amino acid oxidation method is similar to current recommendations. *J Nutr.*, 149, 280–5.
- Ananieva, E. A., & Wilkinson, A. C. (2018). Branched-chain amino acid metabolism in cancer. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care*, 21(1), 64-70. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5732628/>
- Atkins, J. F., & Gesteland, R. F. (2000). The twenty-first amino acid. *Science*, 288(5468), 975-976.
- Bannister, A. J., & Kouzarides, T. (2011). Regulation of chromatin by histone modifications. *Cell Res.*, 21, 381.
- Bartels, D. J., Mitchell, D. A., Dong, X., et al. (1999). Erf2, a novel gene product that affects the localization and palmitoylation of Ras2 in *Saccharomyces cerevisiae*. *Mol. Cell. Biol.*, 19, 6775–6787.



- Beringer, M., Adio, S., Wintermeyer, W., & Rodnina, M. V. (2003). The G2447A mutation does not affect ionization of a ribosomal group taking part in peptide bond formation. *RNA*, 9(10), 1141-1145.
- Birbeck Department of Biological Sciences. (n.d.). *Twenty Essential Amino Acids*.
- Block, R. J., & Mitchell, H. H. (1946). The correlation of the amino-acid composition of proteins with their nutritive value. *Nutr Abstr Rev*, 16, 249–78.
- Bloomgarden, Z. (2018). Diabetes and branched-chain amino acids: What is the link? [Abstract]. *Journal of Diabetes*, 10(5), 350-352. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29369529>
- Brunning, A. (2014, September 16). *A Brief Guide to the Twenty Common Amino Acids*. Compound Interest.
- Chang, C.-K., et al. (2015). Branched-chain amino acids and arginine improve performance in two consecutive days of simulated handball games in male and female athletes: A randomized trial. *PLOS ONE*, 10(3), e0121866. Extrait de <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0121866>
- Condensed Matter. (n.d.). *Amino Acids*.
- Courtney-Martin, G., Ball, R. O., Pencharz, P. B., & Elango, R. (2016). Protein requirements during aging. *Nutrients*, 8(8), 492.
- Di Buono, M., Wykes, L. J., Ball, R. O., & Pencharz, P. B. (2001). Dietary cysteine reduces the methionine requirement in men. *Am J Clin Nutr*, 74, 761–6.
- Elango, R., & Ball, R. O. (2016). Protein and amino acid requirements during pregnancy. *Adv Nutr An Int Rev J*, 7, 839S–44S.
- Elango, R., Humayun, M. A., Ball, R. O., & Pencharz, P. B. (2007). Lysine requirement of healthy school-aged children determined by the Indicator amino acid oxidation method. *J Nutr*, 140, 54–9.
- Ennis, M. A., Ong, A. J., Lim, K., Ball, R. O., Pencharz, P. B., Courtney-Martin, G., et al. (2020). Dietary aromatic amino acid requirements during early and late gestation in healthy pregnant women. *J Nutr*, 150, 3224–30.
- FAO. (2013). *Dietary protein quality evaluation in human nutrition*. Rome.
- FAO/WHO/UNU. (2007). *Protein and amino acid requirements in human nutrition*. Geneva: World Health Organization.
- Fouré, A., & Bendahan, D. (2017). Is branched-chain amino acids supplementation an efficient nutritional strategy to alleviate skeletal muscle damage? A systematic review. *Nutrients*, 9(9), 1047. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5691664/>
- Goldstein, G., Scheid, M., Hammerling, U., et al. (1975). Isolation of a polypeptide that has lymphocyte-differentiating properties and is probably represented universally in living cells. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 72, 11–15.



- Holt, L. E., & Snyderman, S. E. (1961). Report to the council the amino acid requirements of infants. *JAMA*, 175, 100–3.
- Holeček, M. (2018). Branched-chain amino acids in health and disease: Metabolism, alterations in blood plasma, and as supplements. *Nutrition & Metabolism*, 15(1), 33. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5934885/>
- Humayun, M. A., Turner, J. M., Elango, R., Rafii, M., Langos, V., Ball, R. O., et al. (2006). Minimum methionine requirement and cysteine sparing of methionine in healthy school-age children. *Am J Clin Nutr*, 84, 1080–5.
- Institute of Medicine. (2006). *Dietary Reference Intakes: The Essential guide to nutrient requirements*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Jonker, R., et al. (2012). Role of specific dietary amino acids in clinical conditions. *British Journal of Nutrition*, 108(S2), S136-S148. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4734127/>
- Kamiya, Y., Sakurai, A., Tamura, S., et al. (1978). Structure of rhodotorucine A, a novel lipopeptide, inducing mating tube formation in *Rhodospiridium toruloides*. *Biochem. Biophys. Res. Commun.*, 83, 1077–1083.
- Katunin, V. I., Muth, G. W., Strobel, S. A., Wintermeyer, W., & Rodnina, M. V. (2002). Important contribution to catalysis of peptide bond formation by a single ionizing group within the ribosome. *Mol Cell*, 10, 339-346.
- Kim, D.-H., et al. (2013). Effect of BCAA intake during endurance exercises on fatigue substances, muscle damage substances, and energy metabolism substances. *Journal of Exercise Nutrition & Biochemistry*, 17(4), 169–180. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4241904/>
- Kurpad, A. V., Regan, M. M., Raj, T., El-Khoury, A., Kuriyan, R., Vaz, M., et al. (2002). Lysine requirements of healthy adult Indian subjects receiving long-term feeding, measured with a 24-h Indicator amino acid oxidation and balance technique. *Am J Clin Nutr*, 76, 404–12.
- Levene, P., & Alsberg, C. (1906). The cleavage products of vitellin. *J. Biol. Chem.*, 2, 127–133.
- Mahajan, R., Delphin, C., Guan, T., et al. (1997). A small ubiquitin-related polypeptide involved in targeting RanGAP1 to nuclear pore complex protein RanBP2. *Cell*, 88, 97–107.
- Martin, K. E., Pencharz, P. B., Rafii, M., Ball, R. O., Szwiega, S., Elango, R., et al. (2019). The phenylalanine requirement of elderly men and women measured by direct ¹³C carbon oxidation method is similar to that of young adults. *J Nutr*, 149, 1776–84.
- Nakagawa, I., Takahashi, T., Suzuki, T., & Kobayashi, T. (1964). Amino acid requirements of children: nitrogen balance at the minimal level of Essential amino acids. *J Nutr*, 83, 115–8.



- Nie, C., et al. (2018). Branched chain amino acids: Beyond nutrition metabolism. *International Journal of Molecular Sciences*, 19(4), 954. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5979320/>
- Paoletti, A., Courtney-Martin, G., & Elango, R. (2024). Determining amino acid requirements in humans. *Front. Nutr.*, 11, 1400719.
- Paoletti, A., Pencharz, P. B., Ball, R. O., Kong, D., Xu, L., Elango, R., et al. (2023). The minimum methionine requirement for adults aged ≥ 60 years is the same in males and females. *Nutrients*, 15, 4112.
- Park, J. G., et al. (2017). Effects of branched-chain amino acids (BCAAs) on the progression of advanced liver disease: A Korean nationwide, multicenter, retrospective, observational, cohort study. *Medicine*, 96(24), e7094. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5478300/>
- Payne, M., Stephens, T., Lim, K., Ball, R. O., Pencharz, P. B., & Elango, R. (2018). Lysine requirements of healthy pregnant women are higher during late stages of gestation compared to early gestation. *J Nutr*, 148, 94–9.
- Pencharz, P. B., & Ball, R. O. (2003). Different approaches to define individual amino acid requirements. *Annu Rev Nutr*, 23, 101–16.
- Pillai, R. R., Elango, R., Ball, R. O., Kurpad, A. V., & Pencharz, P. B. (2015). Lysine requirements of moderately undernourished school-aged Indian children are reduced by treatment for intestinal parasites as measured by the Indicator amino acid oxidation technique. *J Nutr*, 145, 954–9.
- Ramazi, S., & Zahiri, J. (2021). Post-translational modifications in proteins: resources, tools and prediction methods. *Database*, 2021, baab012.
- Rasmussen, B. F., Ennis, M. A., Dyer, R. A., Lim, K., & Elango, R. (2021). Glycine, a dispensable amino acid, is conditionally indispensable in late stages of human pregnancy. *J Nutr*, 151, 361–9.
- Rodnina, M. V., & Wintermeyer, W. (2003). Peptide bond formation on the ribosome: structure and mechanism. *Current Opinion in Structural Biology*, 13(3), 334–340.
- Rose, W. C., Borman, A., Coon, M. J., & Frederick Lambert, G. (1955). The amino acid requirements of man: X. The lysine requirement. *J Biol Chem*, 214, 579–87.
- Saffran, M. (1998). Amino acid names and parlor games: from trivial names to a one-letter code, amino acid names have strained students' memories. Is a more rational nomenclature possible? *Biochemical Education*, 26(2), 116–118.
- Schoenheimer, R., Ratner, S., & Rittenberg, D. (1939). Studies in protein metabolism VII. The metabolism of tyrosine. *J. Biol. Chem.*, 127, 333–344.
- Short, K. R., Vittone, J. L., Bigelow, M. L., Proctor, D. N., & Nair, K. S. (2004). Age and aerobic exercise training effects on whole body and muscle protein metabolism. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 286, E92–E101.



- Snyderman, S. E., Boyer, A., Norton, P. M., Roitman, E., & Holt, L. E. (1964). The ESSENTIAL amino acid requirements of infants. X. Methionine. *Am J Clin Nutr*, 15, 322–30.
- Stephens, T. V., Payne, M., Ball, R. O., Pencharz, P. B., & Elango, R. (2015). Protein requirements of healthy pregnant women during early and late gestation are higher than current recommendations. *J Nutr*, 145, 73–8.
- Steward, K. (2025, April 1). *Essential Amino Acids: Chart, Abbreviations and Structure*. Technology Networks.
- Stinson, A. (2023, June 23). *BCAAs: Benefits of branched-chain amino acids*. Medical News Today.
- Stoppani, J., et al. (2009). Consuming a supplement containing branched-chain amino acids during a resistance-training program increases lean mass, muscle strength and fat loss. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 6(S1), P1. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3313152/>
- Szwiega, S., Pencharz, P. B., Rafii, M., Lebaron, M., Chang, J., Ball, R. O., et al. (2020). Dietary leucine requirement of older men and women is higher than current recommendations. *Am J Clin Nutr*, 113, 410–9.
- The Biology Project, University of Arizona. (n.d.). *Dr Margaret Oakley Dayhoff*.
- Tian, S., et al. (2017). Dietary protein consumption and the risk of type 2 diabetes: A systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Nutrients*, 9(9), 982. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5622742/>
- Uojima, H., et al. (2017). Effect of branched-chain amino acid supplements on muscle strength and muscle mass in patients with liver cirrhosis. *European Journal of Gastroenterology & Hepatology*, 29(12), 1402-1407. Extrait de <https://www.ingentaconnect.com/content/wk/ejghe/2017/00000029/00000012/art00014>
- Wikipedia contributors. (2024). *Amino acid*. Wikipedia, The Free Encyclopedia.
- Wikipedia contributors. (2024). *Genetic code*. Wikipedia, The Free Encyclopedia.
- Wikipedia contributors. (2024). *Non-proteinogenic amino acids*. Wikipedia, The Free Encyclopedia.
- Wolfe, R. R. (2017). Branched-chain amino acids and muscle protein synthesis in humans: Myth or reality? *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 14(1), 30. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5568273/>
- Zhang, F., et al. (2016). Branched chain amino acids cause liver injury in obese/diabetic mice by promoting adipocyte lipolysis and inhibiting hepatic autophagy. *EBioMedicine*, 13, 157-167. Extrait de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5264279/>
- Zello, G. A., Wykes, L. J., Ball, R. O., & Pencharz, P. B. (1995). Recent advances in methods of assessing dietary amino acid requirements for adult humans. *J Nutr*, 125, 2907–15.



Ce document peut contenir des inexactitudes ; veuillez vérifier attentivement son contenu.
Pour plus d'informations, visitez le site PowerBroadcasts.com.

