



**HAL**  
open science

# Protéines et acides aminés : utilisations par les sportifs et conseils à l'officine

Coralie Bouget

► **To cite this version:**

Coralie Bouget. Protéines et acides aminés : utilisations par les sportifs et conseils à l'officine. Sciences pharmaceutiques. 2020. dumas-03040250

**HAL Id: dumas-03040250**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03040250v1>**

Submitted on 4 Dec 2020

**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.



# THESE

**Pour l'obtention du Diplôme d'État de Docteur en Pharmacie**

**Préparée au sein de l'Université de Caen Normandie**

**Protéines et acides aminés : utilisations par les sportifs et conseils  
à l'officine**

**Présentée par**

**Coralie BOUGET**

**Soutenue publiquement le 25 mai 2020**

**devant le jury composé de**

Monsieur Michel BOULOUARD	Directeur de la faculté des Sciences Pharmaceutiques	Président du jury
Monsieur Patrick SEDILLO	Docteur en pharmacie	Examinateur
Monsieur Pierre-Nicolas BOVALIS	Docteur en pharmacie	Examinateur

**Thèse dirigée par Michel BOULOUARD**

# LISTE DES ENSEIGNANTS-CHERCHEURS

## Directeur de la Faculté des Sciences Pharmaceutiques

Professeur Michel BOULOUARD

## Assesseurs

Professeur Pascale SCHUMANN-BARD

Professeur Anne-Sophie VOISIN-CHIRET

## Directrice administrative

Madame Sarah CHEMTOB

## Directrice administrative adjointe

Madame Emmanuelle BOURDON

## PROFESSEURS DES UNIVERSITES

<b>BOULOUARD Michel</b> .....	Physiologie, Pharmacologie
<b>BUREAU Ronan</b> .....	Biophysique, Chémoinformatique
<b>COLLOT Valérie</b> .....	Pharmacognosie
<b>DALLEMAGNE Patrick</b> .....	Chimie médicinale
<b>DAUPHIN François</b> .....	Physiologie, Pharmacologie
<b>DELEPEE Raphaël</b> .....	Chimie analytique
<b>FABIS Frédéric</b> .....	Chimie organique
<b>FRERET Thomas</b> .....	Physiologie, Pharmacologie
<b>GARON David</b> .....	Botanique, Mycologie, Biotechnologies
<b>GIARD Jean-Christophe</b> .....	Bactériologie, Virologie

**MALZERT-FREON Aurélie** ..... Pharmacie galénique  
**ROCHAIS Christophe** ..... Chimie organique  
**SCHUMANN-BARD Pascale** ..... Physiologie, Pharmacologie  
**SICHEL François**..... Toxicologie  
**SOPKOVA Jana**..... Biophysique, Drug design  
**VOISIN-CHIRET Anne-Sophie**..... Chimie médicinale

**MAITRES DE CONFERENCES DES UNIVERSITES**

**ANDRE Véronique – HDR**..... Biochimie, Toxicologie  
**BOUET Valentine – HDR**..... Physiologie, Pharmacologie  
**CAILLY Thomas – HDR**..... Chimie bio-inorganique, Chimie organique  
**DENOYELLE Christophe – HDR**..... Biologie cellulaire et moléculaire,  
 Biochimie, Cancérologie  
**DHALLUIN Anne** ..... Bactériologie, Virologie, Immunologie  
**ELDIN de PECOULAS Philippe – HDR**..... Parasitologie, Mycologie médicale  
**GROO Anne-Claire** ..... Pharmacie galénique  
**KIEFFER Charline** ..... Chimie médicinale  
**KRIEGER Sophie (Praticien hospitalier) – HDR**..... Biologie clinique  
**LAPORTE-WOJCIK Catherine** ..... Chimie bio-inorganique  
**LEBAILLY Pierre – HDR** ..... Santé publique  
**LECHEVREL Mathilde – HDR** ..... Toxicologie  
**LEGER Marianne** ..... Physiologie, Pharmacologie  
**LEPAILLEUR Alban – HDR**..... Modélisation moléculaire  
**N'DIAYE Monique**..... Parasitologie, Mycologie médicale,  
 Biochimie clinique  
**PAIZANIS Eleni**..... Physiologie, Pharmacologie

**PEREIRA-ROSENFELD Maria de Fatima** ..... Chimie organique et thérapeutique  
**POTTIER Ivannah** ..... Chimie et toxicologie analytiques  
**PREVOST Virginie – HDR** ..... Chimie analytique, Nutrition, Education  
thérapeutique du patient  
**QUINTIN Jérôme** ..... Pharmacognosie  
**RIOULT Jean-Philippe** ..... Botanique, Mycologie, Biotechnologies  
**SINCE Marc** ..... Chimie analytique  
**VILLEDIEU Marie – HDR** ..... Biologie et thérapies innovantes des cancers

**PROFESSEUR AGREGÉ (PRAG)**

**PRICOT Sophie** ..... Anglais

**PERSONNEL ASSOCIÉ À TEMPS PARTIEL (PAST)**

**SAINT-LORANT Guillaume** ..... Pharmacie clinique  
**SEDILLO Patrick** ..... Pharmacie officinale  
**RICHARD Estelle** ..... Pharmacie officinale

**ASSISTANT HOSPITALO-UNIVERSITAIRE**

**JOURDAN Jean-Pierre**

**Enseignants titulaires du Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie**

# REMERCIEMENTS

### **A mon directeur de thèse,**

Mes remerciements vont tout d'abord à mon directeur de thèse, Monsieur Michel BOULOUARD, pour vos relectures et conseils portés sur mon travail.

### **Aux membres de mon jury**

Monsieur Patrick SEDILLO, merci de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse et de l'intérêt porté à mon travail.

Monsieur Pierre-Nicolas BOVALIS, merci de m'avoir fait l'honneur de participer à mon jury de thèse mais également de m'avoir offert ce poste dans votre officine auprès de Madame Jardin et toute l'équipe.

### **A ma famille**

Mes parents, merci pour votre éducation et votre amour. Vous avez toujours été présents pour moi et je suis arrivée à la fin de ces études grâce à vous, de la PACES (difficile !) à mon départ à Caen, vous m'avez toujours aidé et encouragé.

Ma sœur, notre relation est précieuse et peu importe la distance qui nous sépare, nous réussissons toujours à nous voir et à être là l'une pour l'autre.

Steve, après tant d'années auprès de ma sœur, tu fais partie de la famille et on a encore pleins d'anniversaire à fêter ensemble.

### **A celui qui partage ma vie**

Tu m'a inspiré ce sujet de thèse et m'a toujours soutenu pendant ces six années d'étude et encore aujourd'hui. Notre amour est un pilier pour moi, je suis heureuse de partager ma vie avec toi et j'ai hâte que nos projets se réalisent.

**A tous ceux qui m'entourent, de près ou de loin**

Que ce soit la famille ou les ami(e)s, les nouvelles ne sont pas toujours régulières mais je remercie toutes les personnes qui m'ont encouragées pendant ces années. Ségo, je suis contente de t'avoir rencontrée et après nos nombreuses discussions nous sommes enfin à la soutenance de nos thèses ! Margaux, ma plus ancienne amie, peu importe les kilomètres qui nous séparent, notre amitié est toujours présente et je te remercie d'être là.

# TABLE DES MATIERES

<b><u>LISTE DES ENSEIGNANTS-CHERCHEURS</u></b>	<b><u>2</u></b>
<b><u>REMERCIEMENTS</u></b>	<b><u>5</u></b>
<b><u>TABLE DES MATIERES</u></b>	<b><u>8</u></b>
<b><u>LISTE DES ABREVIATIONS</u></b>	<b><u>13</u></b>
<b><u>INTRODUCTION</u></b>	<b><u>16</u></b>
<b><u>LES PROTEINES</u></b>	<b><u>19</u></b>
<b>I. GENERALITES.....</b>	<b>20</b>
A. DEFINITION.....	20
B. ROLES.....	25
<b>II. METABOLISME.....</b>	<b>27</b>
A. SYNTHÈSE PROTÉIQUE OU PROTÉOSYNTHESE .....	28
B. DÉGRADATION PROTÉIQUE OU PROTÉOLYSE .....	30
C. METABOLISME DES ACIDES AMINES (13).....	31
D. RÉGULATION DU METABOLISME PROTÉIQUE (11).....	35
<b>III. BESOINS ET CONSOMMATIONS.....</b>	<b>38</b>
A. LE BILAN AZOTE.....	38
B. LES BESOINS .....	38
<b>IV. LES SOURCES DE PROTEINES .....</b>	<b>41</b>
<b>V. LA QUALITE DES PROTEINES.....</b>	<b>42</b>
<b>VI. LES DANGERS D'UNE CONSOMMATION EN EXCES DE PROTEINES .....</b>	<b>44</b>
A. LE DÉSÉQUILIBRE ACIDO-BASIQUE .....	44
B. LES TROUBLES OSSEUX ET DE L'HOMÉOSTASIE CALCIQUE .....	45
C. LES TROUBLES DE LA FONCTION HÉPATIQUE .....	46

D. LES TROUBLES DE LA FONCTION RENALE .....	46
---	----

---

**LES MUSCLES : ANATOMIE ET PHYSIOLOGIE** **48**

<b>I. ORGANISATION DES MUSCLES STRIES SQUELETTIQUES .....</b>	<b>50</b>
<b>II. LES FIBRES MUSCULAIRES .....</b>	<b>52</b>
<b>III. LA CONTRACTION MUSCULAIRE (45–47) .....</b>	<b>54</b>
<b>IV. L'ATP : MONNAIE D'ÉCHANGE ÉNERGETIQUE.....</b>	<b>57</b>
A. DÉFINITION ET RÔLES .....	57
B. RÉGULATION.....	58
<b>V. LES FILIÈRES ÉNERGETIQUES.....</b>	<b>60</b>
A. VOIE ANAÉROBIE ALACTIQUE.....	60
B. VOIE ANAÉROBIE LACTIQUE.....	61
C. VOIE ANAÉROBIE .....	63

---

**LA COMPLÉMENTATION** **69**

<b>I. LES COMPLÉMENTS ALIMENTAIRES : DÉFINITION ET RÉGLEMENTATION.....</b>	<b>70</b>
A. LA DIRECTIVE EUROPÉENNE 2002/46/CE.....	70
B. LA TRANSPOSITION EN DROIT FRANÇAIS .....	71
C. LES ALLEGATIONS.....	71
D. UN ENGAGEMENT QUALITÉ .....	73
<b>II. LES DIFFÉRENTS TYPES DE PROTÉINES .....</b>	<b>78</b>
A. LA WHEY PROTÉINE.....	78
B. LA CASEINE.....	82
C. LES AUTRES PROTÉINES .....	85
D. UTILISATIONS.....	89
<b>III. LES ACIDES AMINES .....</b>	<b>90</b>
A. LES ACIDES AMINES À CHAINES RAMIFIÉES .....	90

B. LE $\beta$ -HYDROXY- $\beta$ -METHYL BUTYRATE (HMB) .....	94
C. LA GLUTAMINE .....	96
D. L'ARGININE .....	98
E. LA CITRULLINE.....	101
F. L'ALANINE.....	102
G. LA TAURINE.....	104
H. LA GLYCINE.....	106
I. LA CARNITINE.....	108
<b>IV. LA CREATINE.....</b>	<b>110</b>
A. PRESENTATION.....	110
B. METABOLISME.....	110
C. ROLES DE LA CREATINE DANS L'ORGANISME.....	111
D. LES DIFFERENTES CREATINES RETROUVEES SUR LE MARCHÉ.....	111
E. UTILISATIONS .....	112
<b><u>LES CONSEILS A L'OFFICINE</u></b> .....	<b>114</b>
<b>I. ESTIMER LES BESOINS .....</b>	<b>115</b>
A. LE METABOLISME DE BASE ET LES DEPENSES ENERGETIQUES .....	115
<b>II. INTEGRER LES COMPLEMENTS ALIMENTAIRES AUX OBJECTIFS DU SPORTIFS.....</b>	<b>117</b>
A. LE SPORTIF D'ENDURANCE .....	117
B. LE SPORTIF DE FORCE .....	118
C. LES CONSEILS ASSOCIES .....	119
<b><u>CONCLUSION</u></b> .....	<b>121</b>
<b><u>BIBLIOGRAPHIE</u></b> .....	<b>123</b>
<b><u>TABLES DES ILLUSTRATIONS</u></b> .....	<b>141</b>

I. LISTE DES FIGURES..... 142

II. LISTE DES TABLEAUX..... 144

ANNEXES..... 145

---

ANNEXE 1 : BROCHURE DESTINEE AUX SPORTIFS MISE A DISPOSITION PAR LE CESPARM (61).. 146

ANNEXE 2 : RESUME DES EFFETS POTENTIELS DES ACIDES AMINES ET DERIVES AINSI QUE LEUR  
PRISE..... 148

# LISTE DES ABREVIATIONS

AA : Acide Aminé

Acétyl-CoA : Acétyl Co-enzyme A

AFSSA : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments

ANC : Apport Nutritionnel Conseillé

AMA : Agence Mondiale Antidopage

ADN : Acide DésoxyriboNucléique

ADP : Adénosine Di-Phosphate

AET : Apport Energétique Total

AFNOR : Association Française de Normalisation

AMA : Agence Mondiale Antidopage

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

ANC : Apport Nutritionnel Conseillé

ANSES : Agence Nationale de Sécurité de l'alimentation, de l'environnement et du travail

ARN : Acide RiboNucléique

ATP : Adénosine Tri-Phosphate

BCAA : « Branched Chain Amino Acid » ou acides aminés branchés ou acides aminés à chaînes ramifiées

Cr : Créatine

DGCCRF : Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes

EFSA : « European Food Safety Authority »

FAD : Flavine Adénine Dinucléotide

GH : « Growth Hormone » ou hormone de croissance

INCA : étude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires

Kcal : Kilocalorie

MB : Métabolisme de Base

NAD : Nicotinamide Adénine Dinucléotide

NAP : Niveau d'Activité Physique

NO : Monoxyde d'azote

PAL : « Physical Activity Level »

PCr : PhosphoCréatine

PDCAAS : « Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score »

PRAL : « Potential Renal Acid Loading »

SCCD : Score Chimique Corrigé de Digestibilité

# INTRODUCTION

Plus qu'une activité physique, le sport est devenu en quelques années un élément d'un style de vie actif et sain recherché par de nombreuses personnes. Ce mode de vie actif est associé à l'explosion de la fréquentation des salles de remise en forme mais aussi à l'augmentation de la consommation de produits de nutrition sportive. Le marché de la nutrition sportive ne cesse donc de s'élargir concernant non seulement les sportifs confirmés et professionnels mais également, les amateurs. Ces derniers recherchent des produits pouvant les soutenir dans leur activité sportive (gain musculaire, perte de graisses, amélioration des performances) et dans leur récupération. Parmi les produits les plus en vue, on retrouve ceux à base de protéines et d'acides aminés. Souvent commercialisés sous forme de poudre ou gélule, ils sont aussi déclinés en produits nomades comme les boissons et les barres protéinées. Le consommateur se retrouve alors face à un nombre important de substances et de marques. Les professionnels de santé, et les pharmaciens en particulier, ont donc un rôle important à jouer afin de conseiller au mieux toute personne souhaitant se compléter.

Le marché des compléments alimentaires en France connaît une croissance importante depuis plusieurs années. L'Agence de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) a réalisé en 2006-2007 et en 2014-2015 deux études afin de mieux connaître les consommations alimentaires des français (1,2). Le taux de consommateurs de compléments alimentaires a nettement progressé entre ces deux études, aussi bien chez les enfants de 3 à 17 ans (passant de 12% à 19%) que chez les adultes (passant de 20% à 29%). A noter que les compléments alimentaires sont principalement achetés en pharmacie (78% pour les enfants et 45% pour les adultes) mais l'achat sur internet s'est fortement développé chez les adultes (passant de 1% à 11%). Le prix des compléments étant parfois moins cher sur internet, le pharmacien doit donc connaître parfaitement les produits qu'il a choisis de délivrer dans ce domaine, afin de répondre aux demandes avec des conseils précis et personnalisés.

Dans cette thèse, nous allons nous intéresser aux compléments alimentaires contenant des protéines et des acides aminés. Pour comprendre le bien-fondé de ces produits, nous aborderons, dans un premier temps, la biochimie des protéines, les besoins mais également les dangers d'une surconsommation. Par la suite, nous aborderons la physiologie musculaire, de la structure des muscles squelettiques aux filières énergétiques. Enfin, nous présenterons les différents compléments alimentaires contenant des protéines et les différents acides aminés utilisés par les sportifs ainsi que leurs conseils à l'officine.

# LES PROTEINES

# I. Généralités

## A. Définition

Les protéines, du grec « protos » qui signifie « primordial, primitif », sont des composés organiques constitués de carbone (C), d'hydrogène (H), d'oxygène (O) et d'azote (N), auxquels s'ajoute parfois le soufre (S). Leur structure monomérique est l'acide aminé (AA). En fonction de l'importance de la polymérisation et de la composition, on peut distinguer différents types de protéines (figure 1).

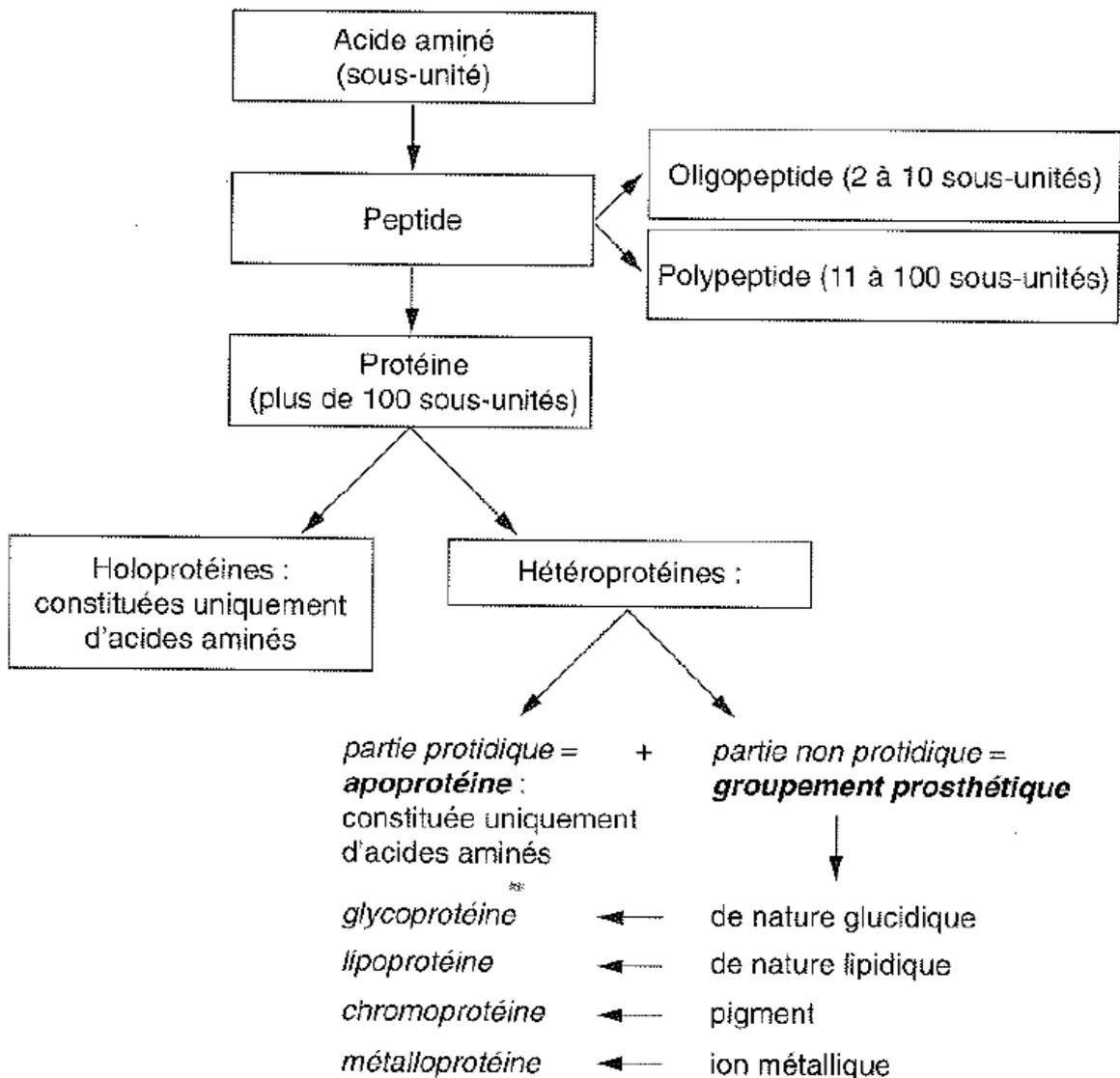


Figure 1 : les différents types de protéines (3)

## 1. Les acides aminés

Ce sont les sous-unités des protéines. Ils ont pour structure moléculaire commune : une fonction carboxylique (COOH) et une fonction amine primaire (NH<sub>2</sub>) portées par le carbone  $\alpha$  et un radical dont la composition détermine la nature de l'acide aminé. Chaque acide aminé (sauf la glycine) a un pouvoir rotatoire soit positif (dextrogyre), soit négatif (lévogyre) (figure 2).

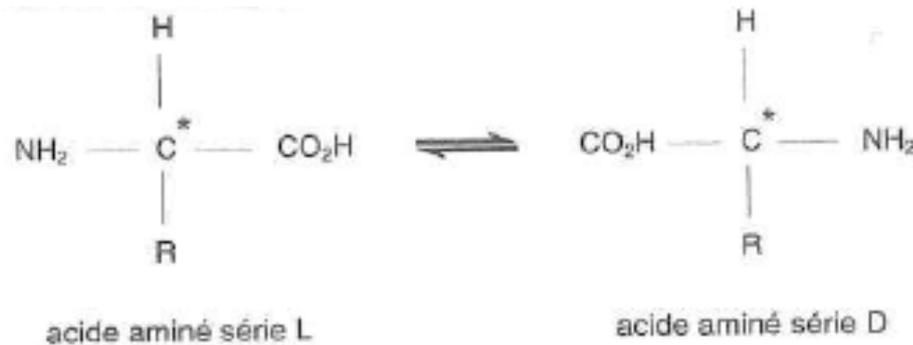


Figure 2: constitution d'un acide aminé (4)

Seuls vingt acides aminés (figure 3) sont constitutifs des protéines sur presque 500 acides aminés connus : ils sont appelés acides aminés protéinogènes. Parmi ceux-ci, huit doivent être apportés par l'alimentation car l'organisme humain ne peut pas les synthétiser à une vitesse suffisante pour assurer le maintien des fonctions biologiques associées : ce sont les acides aminés dit « essentiels ou indispensables » : valine, leucine, isoleucine, thréonine, méthionine, lysine, phénylalanine, tryptophane. On retrouve également l'histidine chez l'enfant et la personne âgée. Les douze autres sont dit « non essentiels » puisque l'organisme peut les synthétiser : arginine, acide aspartique (aspartate), cystéine, acide glutamique (glutamate), glutamine, glycine, ornithine, proline, sérine, alanine, asparagine et tyrosine. Cette classification est simplifiée et établie d'un point de vue nutritionnelle puisque parmi les acides aminés dit « non essentiels », certains pourront être requalifiés de semi-essentiels car ils seront indispensables à certaines périodes de la vie et l'organisme ne les synthétisera pas en quantité suffisante, et certains acides aminés essentiels peuvent être synthétisés par l'organisme à partir de précurseurs (5).

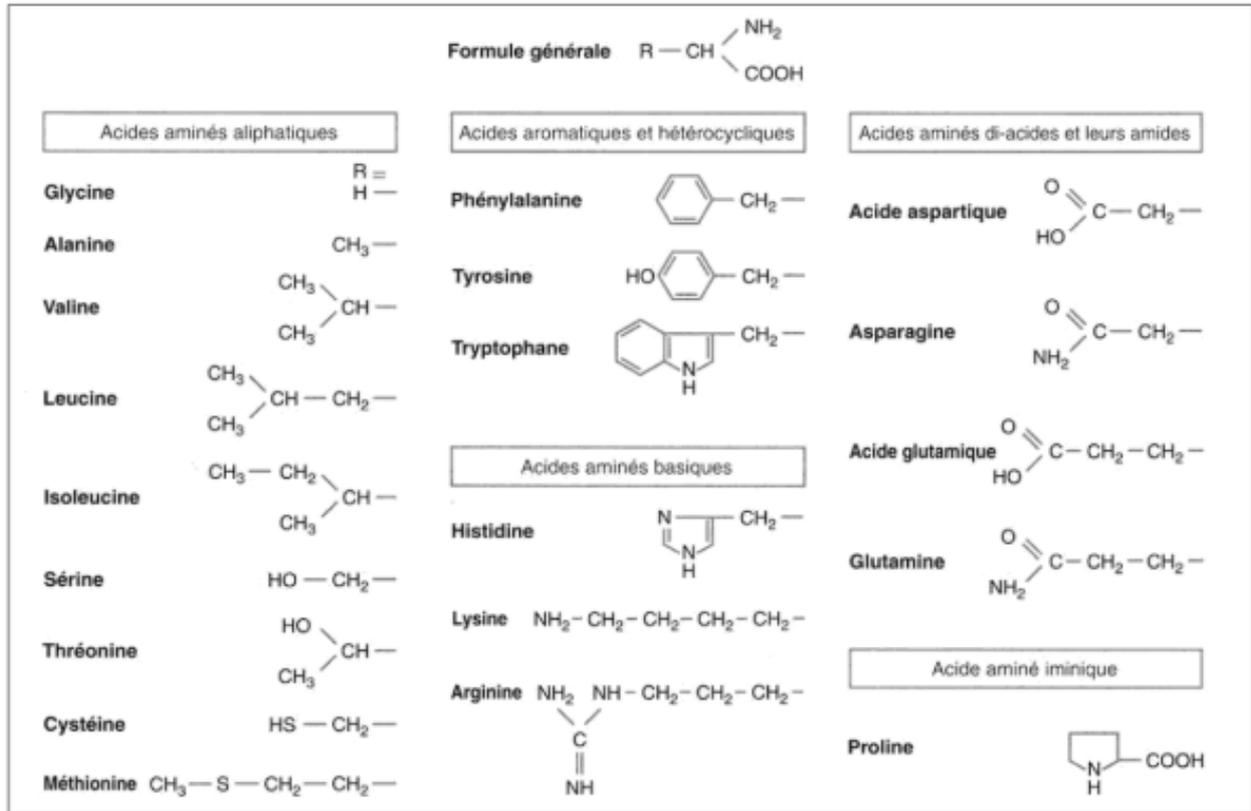


Figure 3 : les vingt acides aminés protéinogènes (6)

## 2. Les différentes structures

La liaison d'un groupement  $\alpha$ -carbonyle d'un acide aminé avec le groupement aminé d'un autre acide aminé conduit à la formation d'un peptide (figure 4). Ce lien  $-CO-NH-$  est une liaison peptidique. Il existe différents peptides qui ont un intérêt biologique comme par exemple le glutathion (qui joue un rôle important au niveau cellulaire en neutralisant les radicaux libres), l'ocytocine (qui stimule la contraction des muscles lisses), l'ADH (hormone antidiurétique qui stimule la réabsorption d'eau par le rein).

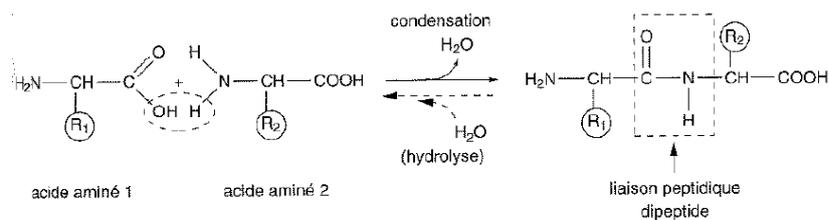


Figure 4 : formation d'une liaison peptidique (3)

Un enchaînement de plusieurs peptides (10 à 100 acides aminés) conduit à la formation d'un polypeptide. Par exemple, l'insuline est un polypeptide constitué de deux chaînes (l'une de 21 AA et l'autre de 30 AA) avec deux ponts disulfure inter-chaînes et un pont disulfure reliant deux cystéines de la plus petite des chaînes. Au-delà de 100 acides aminés, on parle d'une chaîne protéique.

La structure des protéines se décompose en quatre parties (figure 5). La succession spécifique des acides aminés constitue la structure primaire d'une protéine, elle est génétiquement déterminée. La stabilité de la chaîne polypeptidique est assurée par des liaisons avec des atomes d'hydrogène. C'est la structure secondaire d'une protéine qui confère à la molécule une structure hélicoïdale (hélice  $\alpha$ ) ou un feuillet plissé (structure  $\beta$ ). Ces conformations sont déterminées par les liaisons peptidiques et par les interactions entre acides aminés proches mais non voisins. La structure tertiaire détermine l'assemblage des formes élémentaires  $\alpha$  et  $\beta$  selon les trois directions spatiales (grâce à une stabilisation par des liaisons de type acide-base et des ponts disulfures). Plusieurs chaînes polypeptidiques identiques ou légèrement différentes peuvent s'assembler pour former une structure quaternaire. C'est le cas de l'hémoglobine (4 chaînes primaires) et de nombreuses enzymes intervenant dans les régulations métaboliques.

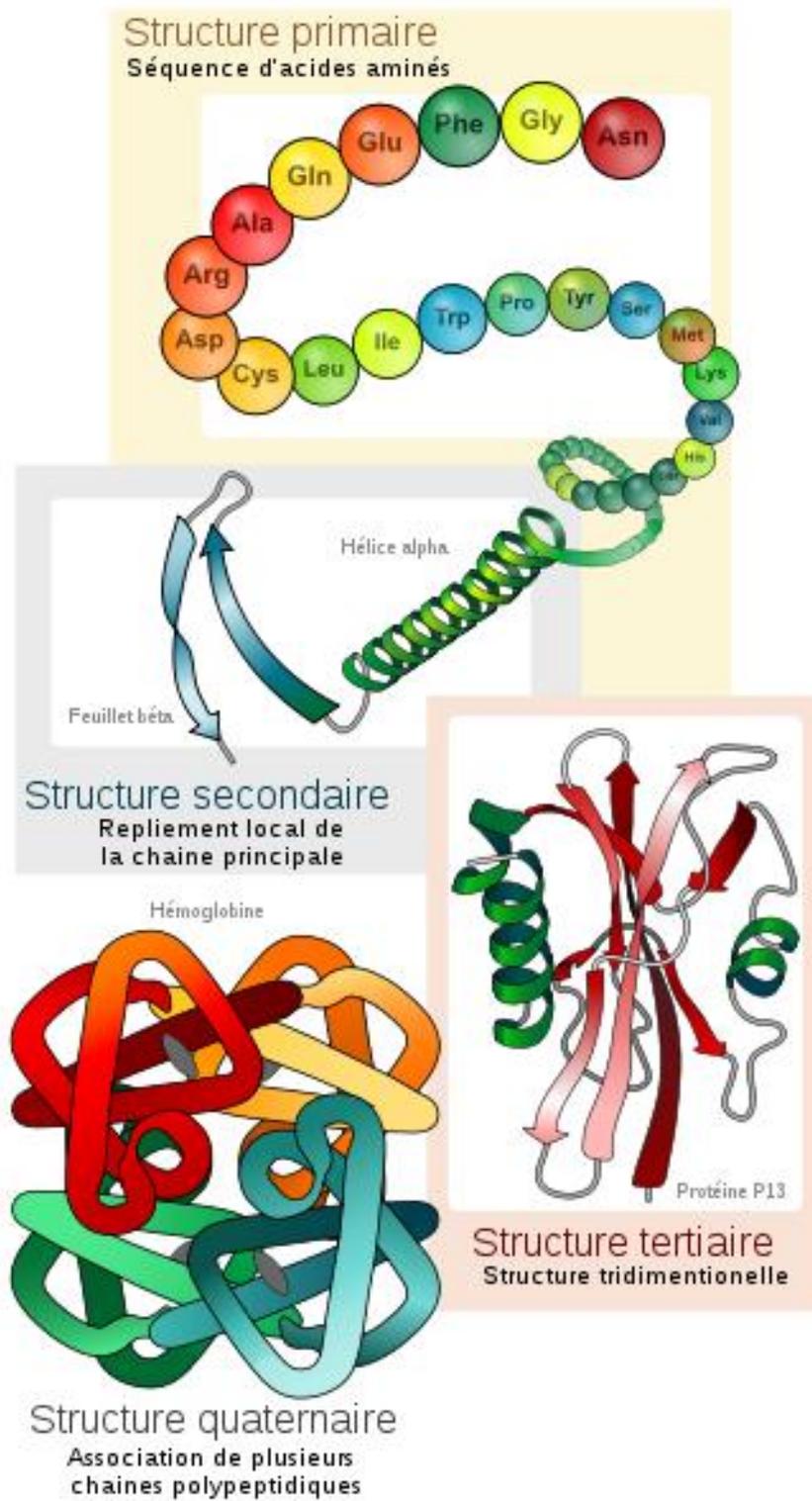


Figure 5: les différentes structures des protéines (7)

## B. Rôles

Les protéines sont considérées comme des biomolécules d'une toute première importance. Sur le plan quantitatif, elles représentent 15 à 20 % du poids corporel. Sur le plan qualitatif, elles assurent de nombreux rôles :

- Rôles structuraux
  - Rôle de support mécanique et de soutien des tissus : c'est le cas du collagène, protéine la plus abondante de l'organisme, qui entre dans la composition des matériaux extra-cellulaires du tissu conjonctif
  - Rôle de support mécanique à l'échelle cellulaire : c'est le cas des protéines du cytosquelette (actine, tubuline...) qui sont responsables de la forme des cellules
- Rôles fonctionnels vitaux
  - Rôle de catalyseur biochimique : les enzymes
  - Rôle de transporteur sanguin : l'albumine, l'hémoglobine
  - Rôle de transporteur membranaire : les protéines contrôlent quantitativement et qualitativement les échanges entre la cellule et le milieu extra-cellulaire
  - Rôle de médiateur chimique : avec les hormones protéiques comme l'insuline et le glucagon
  - Rôle de récepteur membranaire
  - Rôle de maintien de l'intégrité de l'organisme : les immunoglobulines ou les protéines du système du complément jouent un rôle capital dans la défense immunitaire
  - Rôle de mouvement : les protéines contractiles (actine-myosine) permettent le mouvement du squelette ou de certains organes internes.

En outre, les protéines contribuent également à l'apport énergétique : 1 gramme de protéines apporte 4 kilocalories (kcal). Ce facteur de 4 kcal est appelé facteur d'Atwater qui est le nom du

chimiste qui a réalisé les premières études sur la nutrition humaine et la balance énergétique. La chaleur moyenne de combustion des protéines est en réalité de 5,65 kcal par gramme mais la valeur énergétique nette dont dispose l'organisme est de 4,6 kcal par gramme. Le coefficient de digestibilité, c'est-à-dire le pourcentage d'aliments consommés qui sont réellement digérés et absorbés, est en moyenne de 92%. On obtient ainsi la valeur de 4 kcal (8).

Vu leur importance physiologique et étant donné qu'elles ne peuvent pas être stockées de façon significative, toute carence alimentaire en protéines risque d'entraîner de graves dysfonctionnements de l'organisme.

## II. Métabolisme

Le métabolisme des protéines intègre l'ensemble des processus régulant le métabolisme des acides aminés et le renouvellement des protéines corporelles.

Les protéines de l'organisme font l'objet d'un renouvellement permanent. Le maintien de la masse protéique résulte, chez l'adulte (c'est-à-dire hors phase de croissance), d'un équilibre entre la protéogénèse (biosynthèse des protéines : environ 300g/j) et la protéolyse (dégradation des protéines : environ 300g/j) (9). On estime que ce renouvellement s'effectue à partir de 80g/j de protéines d'origine alimentaire (via les acides aminés), le reste (220g/j) étant recyclé à partir de protéines endogènes dégradées.

Ce renouvellement protéique concerne tous les tissus mais est particulièrement important au niveau des muscles (20% du renouvellement protéique total), du foie (environ 10%), de l'intestin et de la peau (environ 15% chacun). Ces taux varient selon l'âge, l'état nutritionnel et l'état pathologique des personnes.

Les étapes de ce métabolisme sont la synthèse protéique (protéosynthèse ou anabolisme), la dégradation des protéines (protéolyse ou catabolisme), l'utilisation des acides aminés dans les voies oxydatives ou comme précurseurs de composés azotés, la synthèse *de novo* des acides aminés non indispensables et l'apport alimentaire d'acides aminés indispensables et non indispensables (10) (figure 6).

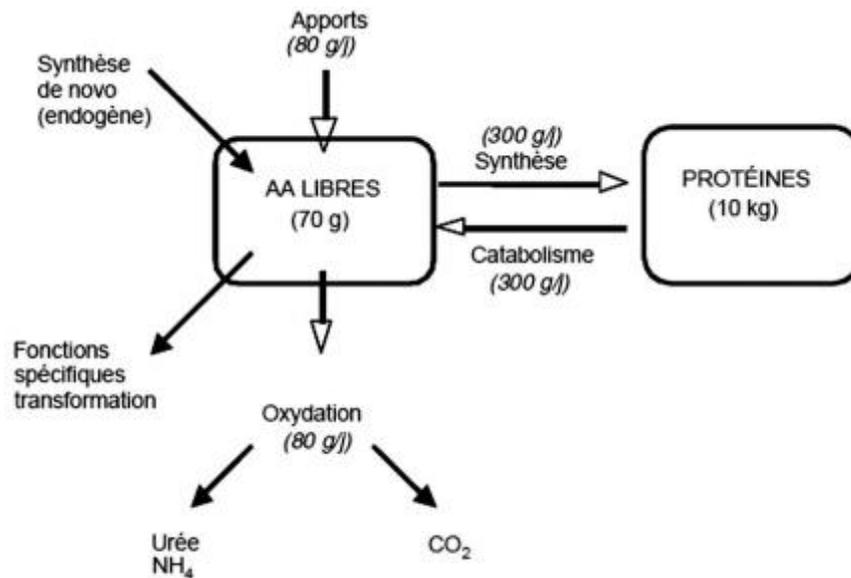


Figure 6 : schéma général du métabolisme protéique chez l'homme (11)

## A. Synthèse protéique ou protéosynthèse

### 1. L'entrée des acides aminés dans la cellule

La synthèse protéique nécessite l'ensemble des vingt acides aminés protéinogènes qui entrent dans les cellules grâce à des transporteurs fixés sur la membrane externe (muscle y compris). L'absence d'un seul acide aminé peut bloquer la synthèse et on parlera alors d'acide aminé limitant.

### 2. Le code génétique

Les acides nucléiques (ADN et ARN) assurent le stockage, l'expression et la transmission de l'information génétique. L'acide désoxyribonucléique (ADN) stocke l'information génétique. L'acide ribonucléique (ARN) intervient dans le décodage de l'information de l'ADN pour donner des instructions dirigeant la liaison successive d'acides aminés et former des protéines.

L'ADN contient l'information déterminant la séquence des acides aminés dans les protéines, mais il ne participe pas lui-même directement à l'assemblage des molécules protéiques. La plus grande partie de l'ADN d'une cellule est contenue dans le noyau, alors que la synthèse protéique a lieu essentiellement dans le cytoplasme. Le transfert d'information entre l'ADN et les sites de

synthèse protéique se fait par l'intermédiaire des molécules d'ARN, dont la synthèse est gouvernée par l'information codée dans l'ADN. L'information génétique est transmise de l'ADN à l'ARN, puis dans la protéine. Ce transfert de l'information de l'ADN à l'ARN dans le noyau est appelé transcription. La traduction est le processus par lequel l'information codée dans l'ARN est utilisée pour former une protéine dans le cytoplasme (figure 7).

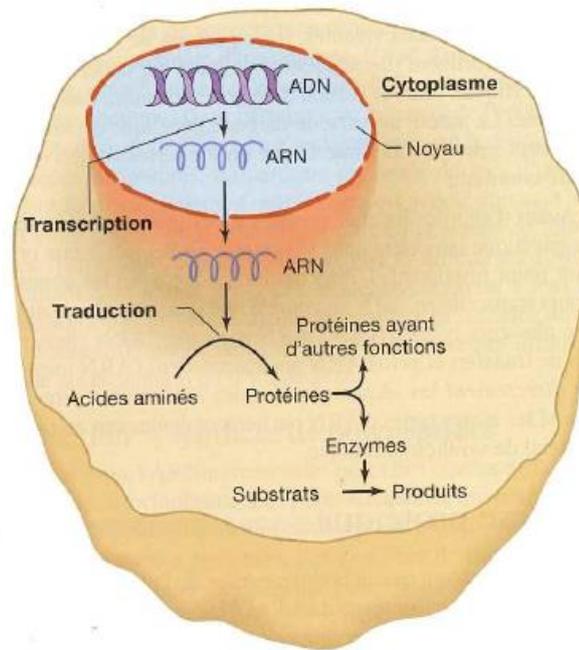


Figure 7: l'expression de l'information génétique (12)

### 3. L'assemblage des protéines

Le processus d'assemblage d'une chaîne polypeptidique en fonction d'un message transmis par un ARN messenger (ARNm) comporte trois étapes : initiation, élongation, terminaison. La synthèse débute par la fixation d'un ARN de transfert (ARNt) contenant l'acide aminé méthionine sur la petite sous-unité ribosomale. Plusieurs protéines appelées facteurs d'initiation sont nécessaires pour créer un complexe d'initiation, qui place l'ARNt contenant la méthionine en regard du codon de l'ARNm qui signale le site où doit débuter l'assemblage. Après le processus d'initiation, la chaîne protéique s'allonge par addition successive d'acides aminés (il s'agit de l'élongation). Quand le ribosome atteint une séquence de terminaison de l'ARNm (appelée codon stop) signalant la fin de

la protéine, le lien entre la chaîne polypeptidique et le dernier ARNt est rompu, et la protéine complète est libérée du ribosome. Dans certains cas, la protéine subit un traitement post-traductionnel (appelé maturation), avec fixation de divers groupements chimiques sur des chaînes latérales spécifiques et/ou fractionnement de la protéine en plusieurs chaînes polypeptidiques plus petites.

## B. Dégradation protéique ou protéolyse

Il existe trois voies de protéolyse. Elles constituent la principale source d'acides aminés pour l'organisme qui seront utilisables dans de nombreuses voies métaboliques.

La dégradation des différentes protéines se fait à des vitesses variables. Cela dépend en partie de la structure de la protéine, certaines protéines ayant une plus forte affinité que d'autres pour quelques enzymes protéolytiques. Une protéine dénaturée (dépliée) est plus facilement digérée qu'une protéine dont la configuration est intacte.

La première voie est la voie ubiquitine-protéasome-dépendante (figure 8). Son rôle est prépondérant dans le muscle squelettique car elle dégrade les protéines contractiles majeures et contribue pour environ 60% aux variations de la protéolyse totale. La dégradation des protéines peut donc être déclenchée par la fixation d'un petit peptide, l'ubiquitine, sur la protéine. Ce peptide dirige la protéine vers un complexe protéique appelé protéasome qui déplie la protéine et la scinde en petits peptides. Cette voie est ATP-dépendante.

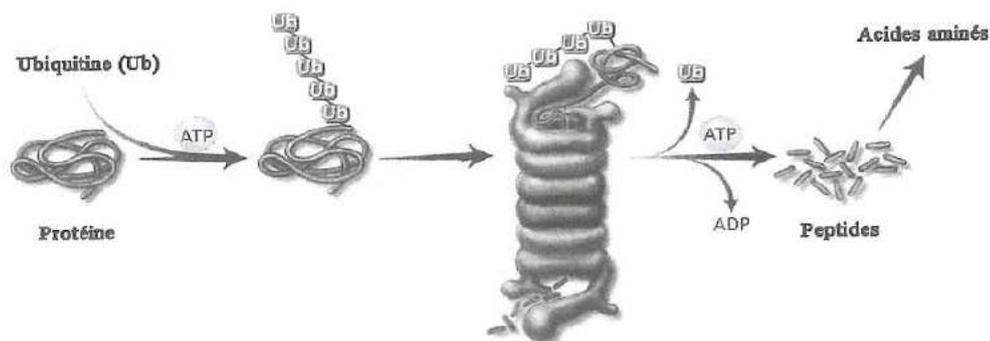


Figure 8 : dégradation des protéines par le protéasome (4)

La seconde voie est la voie lysosomale, calcium-dépendante et qui ne compte que pour 10 à 20% de la protéolyse musculaire totale. Les lysosomes sont des organites intracellulaires particulièrement abondants dans le foie. Les protéines peuvent arriver dans le lysosome par endocytose ou par autophagie. Ce système utilise des protéases acides, les cathepsines.

La troisième voie est celle de la dégradation des protéines par les caspases. Elles interviennent dans le mécanisme de l'apoptose (mort cellulaire). Cette voie va permettre d'éliminer les protéines en excès ou les éléments protéiques étrangers à l'organisme. Les caspases seront activées par différents facteurs pour aboutir à la protéolyse par une cascade de réactions.

Ces mécanismes de dégradation sont soumis à des contrôles, qui sont encore mal connus, afin d'éviter une dégradation trop importante et indésirable des protéines.

## C. Métabolisme des acides aminés (13)

### 1. Catabolisme des acides aminés

Il ne s'agit pas ici de protéolyse mais de dégradation irréversible des acides aminés. Contrairement aux monomères des glucides et des lipides, les acides aminés en excès ne peuvent pas être stockés. Le catabolisme démarre par une désamination oxydative (figure 9) ou une transamination (figure 10) permettant la séparation de l'azote du squelette carboné.

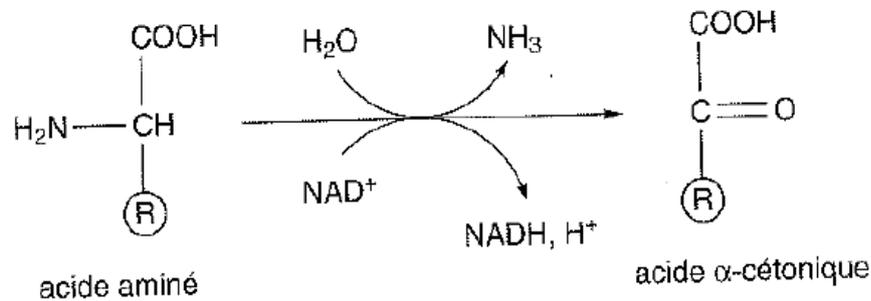


Figure 9 : désamination oxydative

Dans la désamination oxydative, le groupement amine donne naissance à une molécule d'ammoniaque (NH<sub>3</sub>) et est remplacé par un atome d'hydrogène provenant de l'eau pour former un acide cétonique.

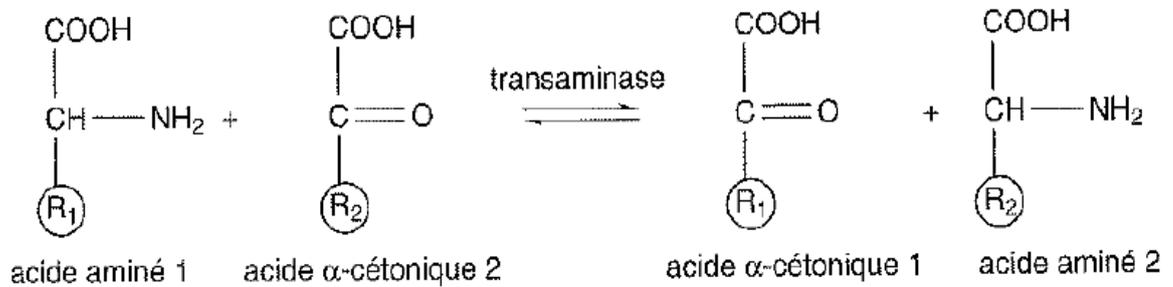


Figure 10 : transamination

Dans la transamination, il y a transfert du groupement amine d'un acide aminé vers un acide cétonique. Les réactions de transaminations se font par l'intermédiaire de transaminases dont les plus actives sont l'ALAT (alanine aminotransférase) et l'ASAT (aspartate aminotransférase) L'acide cétonique qui reçoit le groupement amine devient un acide aminé.

L'ammoniaque synthétisé au cours de la désamination oxydative pourrait s'avérer très toxique pour les cellules s'il s'accumulait. Il est transféré sur le glutamate avec formation de glutamine et sur l'urée au niveau hépatique. L'urée est relativement atoxique et est le principal produit de dégradation azoté qui ira dans le sang puis les urines par excrétion rénale.

Le devenir des radicaux oxydés diffère selon les organes et selon l'acide aminé : ils peuvent redonner un acide aminé identique ou un acide aminé non essentiel via les amino-transférases ou ils peuvent être irréversiblement détruits et fournir de l'énergie

## 2. Devenir du squelette carboné

Après le départ du groupe  $\alpha$ -aminé, les 20 acides aminés, retrouvés dans les protéines, libèrent chacun l' $\alpha$ -cétoacide (squelette carboné) correspondant. La dégradation des 20 squelettes carbonés

(figure 11) conduit à la formation de sept composés :  $\alpha$ -cétoglutarate, oxaloacétate, fumarate, acétoacétyl-CoA, succinyl-CoA, pyruvate et acétyl-CoA. Ils rentrent dans le métabolisme intermédiaire pour la production de l'énergie ou pour la synthèse des glucides ou des lipides. Suivant le devenir des squelettes carbonés, on classe les acides aminés en trois groupes : les acides aminés glucoformateurs (alanine, asparagine, aspartate, glutamate, glutamine, proline, glycine, sérine, cystéine, arginine, histidine, méthionine, thréonine et valine), les acides aminés cétogènes (leucine et lysine) et les acides aminés à la fois glucoformateurs et cétogènes (tyrosine, phénylalanine, tryptophane et isoleucine).

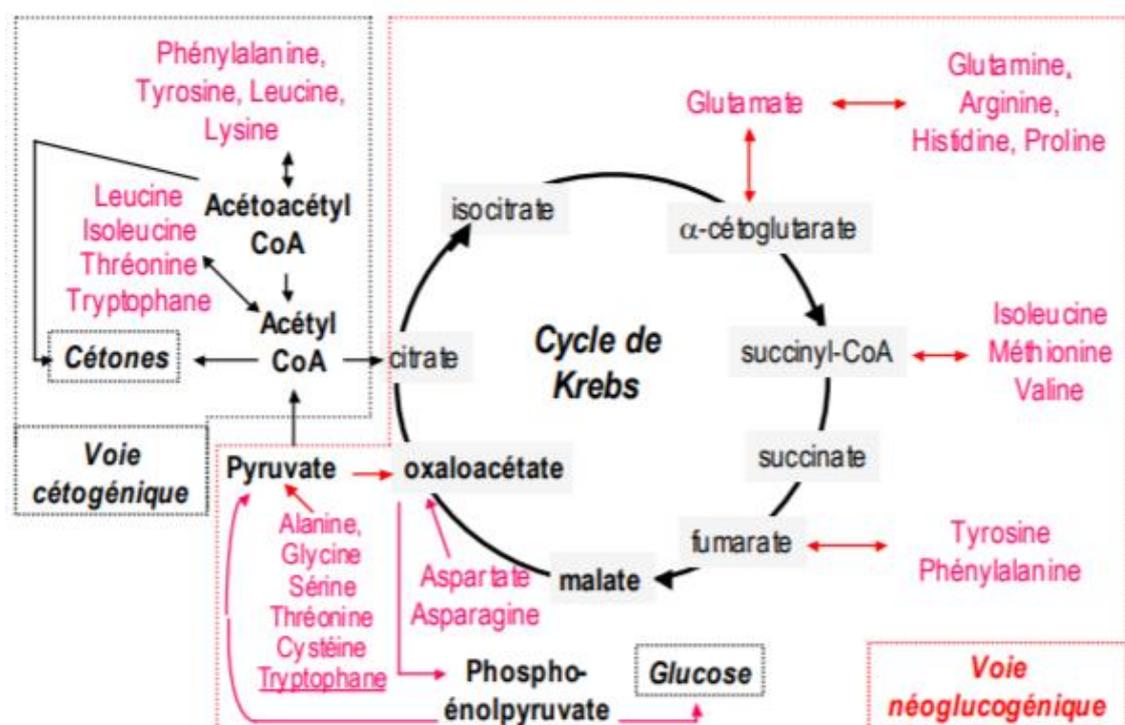


Figure 11 : les squelettes carbonés de plusieurs AA entrent dans le cycle de Krebs par différentes voies (10)

### 3. Synthèse de novo des acides aminés

On vient de voir précédemment qu'il était possible pour le squelette carboné de retrouver une fonction amine ( $\text{NH}_2$ ) et donc de « synthétiser » un nouvel acide aminé.

La distinction des acides aminés en indispensables et non indispensables provient de la capacité de l'organisme à synthétiser ou non leur radical carboné à partir de précurseurs métaboliques tels que le glucose ou d'autres acides aminés. Ces voies ne sont pas toujours présentes dans tous les tissus.

Pour donner quelques exemples, l'arginine est produite dans le rein à partir de la citrulline et d'un donneur d'azote (glutamate ou aspartate) ; la citrulline provient de l'alimentation ou est produite dans le foie ou le rein à partir de la glutamine. La tyrosine est produite dans le foie à partir de la phénylalanine. Du fait, lors de certaines situations pathologiques, par exemple en cas de phénylcétonurie (trouble du métabolisme de la phénylalanine, qui induit une accumulation toxique de celle-ci et nécessite son éviction de l'alimentation), la tyrosine ne peut plus être synthétisée et devient essentielle (14).

Plusieurs voies peuvent exister pour un acide aminé donné. En outre, il est généralement admis que les acides aminés non indispensables jouent un rôle dans le recyclage des acides aminés indispensables, à l'exception de la lysine et la thréonine, en permettant leur régénération à partir de leur acide cétonique par transamination.

#### 4. Acides aminés précurseurs de composés actifs

Des quantités non négligeables d'acides aminés possèdent des activités physiologiques spécifiques ou sont utilisées comme précurseurs pour la synthèse de composés tels que le glutathion, la carnitine, la créatine, la carnosine, la taurine, le monoxyde d'azote, les polyamines, les bases puriques et pyrimidiques et de nombreux neuromédiateurs (5) (tableau 1).

<b>Acides aminés précurseurs</b>	<b>Dérivés</b>
<b>Méthionine</b>	Créatine, carnitine, choline, adrénaline
<b>Cystéine</b>	Glutathion, taurine, sels biliaires

<b>Phénylalanine/tyrosine</b>	Hormones thyroïdiennes, catécholamines, neurotransmetteurs, mélanine
<b>Tryptophane</b>	Sérotonine, mélatonine
<b>Glutamate</b>	Neurotransmetteurs, glutathion
<b>Aspartate</b>	Nucléotides
<b>Glycine</b>	Nucléotides, créatine, glutathion, sels biliaires
<b>Lysine</b>	Carnitine
<b>Arginine</b>	Créatine, urée, monoxyde d'azote, polyamines
<b>Histidine</b>	Histamine, carnosine

*Tableau 1 : les acides aminés comme précurseurs de composés azotés*

## D. Régulation du métabolisme protéique (11)

On peut distinguer deux modes de régulation : la régulation hormonale et la régulation nutritionnelle. Cependant, ces deux modes de régulation sont simultanés et agissent en synergie lors de la prise alimentaire.

### 1. Régulation hormonale (15,16)

Les hormones peuvent être anabolisantes (favorisant le gain musculaire) ou catabolisantes (favorisant la perte musculaire).

L'insuline, l'hormone de croissance (GH pour Growth Hormone), les androgènes et les catécholamines sont des hormones anabolisantes. Elles peuvent être utilisées de façon illégale dans les milieux sportifs pour augmenter la masse musculaire.

L'insuline, protéine constituée de 51 AA et sécrétée par les cellules  $\beta$  du pancréas, stimule les étapes de transcription et de traduction, notamment au niveau musculaire ; elle diminue en parallèle la protéolyse musculaire.

L'hormone de croissance est une hormone peptidique produite et sécrétée principalement par l'antéhypophyse selon un mode pulsatile avec des pics de nuit après l'endormissement et des pics de jour spontanés ou favorisés par différents stimulus (stress, alimentation...). Sa production est plus élevée chez l'enfant et diminue avec l'âge. Elle est anabolisante par un effet stimulant de la synthèse protéique agissant directement et par l'intermédiaire des facteurs de croissance (« Insulin-like Growth Factor-1 » ou IGF-1) (17).

Les androgènes ont comme chef de file la testostérone. L'effet anabolisant de la testostérone sur le muscle s'exerce de deux manières. Tout d'abord, elle peut s'exercer de manière directe avec une meilleure incorporation des acides aminés et la synthèse des protéines contractiles ou non. Elle peut également s'exercer de manière indirecte avec une interaction avec le système IGF-1 ou en inhibant le gène de la myostatine, qui est régulateur de la croissance musculaire, ou par une action anti-glucocorticoïde.

Les catécholamines (noradrénaline et adrénaline) ont longtemps été classées parmi les hormones catabolisantes mais il est bien démontré aujourd'hui que ces dernières sont anabolisantes vis-à-vis du métabolisme protéique en réduisant la protéolyse ou bien en augmentant la synthèse protéique.

Les glucocorticoïdes (cortisol) et les cytokines (TNF, interleukines) ont une action catabolisante par augmentation de la protéolyse musculaire et par inhibition de la traduction des protéines. On retrouve par exemple une fonte protéique lors des hypercorticismes (maladie de Cushing) ou des traitements par glucocorticoïdes au long cours.

Pour finir, à l'inverse de l'insuline, le glucagon a un effet catabolisant en augmentant la capture des acides aminés par les hépatocytes, ce qui favorise la néoglucogénèse à partir des acides aminés.

Les hormones thyroïdiennes ont une action complexe. Un excès ou un déficit en hormone thyroïdienne a un impact négatif sur la performance à l'exercice. Un état d'euthyroïdie est

indispensable. Une hyperthyroïdie va plutôt provoquer une fonte musculaire et une hypothyroïdie s'accompagne d'une diminution du débit sanguin et du transfert de l'oxygène aux muscles squelettiques.

## 2. Régulation nutritionnelle

En période post-prandiale, l'apport alimentaire fournit une quantité importante d'acides aminés et de substrats énergétiques (glucose, acide gras...) favorables à la protéosynthèse. Ce contexte d'hyperglycémie est de plus, favorable à la sécrétion d'insuline, hormone stimulant l'entrée des acides aminés dans les cellules.

### III. Besoins et consommations

#### A. Le bilan azoté

Le bilan azoté est la différence entre les apports alimentaires en protéines et l'élimination des déchets azotés (par les urines, les fèces, la sueur). La réalisation du bilan azoté est délicate en pratique car on doit tenir compte de l'azote urinaire (le recueil des urines doit donc être méticuleux), la quantification des apports, l'excrétion azotée fécale et les autres pertes azotées (sueurs, phanères...).

Ce bilan doit rester positif pour éviter l'utilisation excessive des réserves en acides aminés de l'organisme (dont les constituants musculaires). Il n'est équilibré qu'à la condition de satisfaire à la fois les besoins en acides aminés indispensables et en azote total. Le besoin en protéines est généralement assimilé à l'apport minimum en protéines de bonne qualité qui assure l'équilibre du bilan azoté.

Au repos, le bilan protéique est négatif car en l'absence d'apports azotés, seuls les acides aminés dérivés de la protéolyse sont réutilisés pour les synthèses protéiques. Ce bilan est en revanche positif dès que la disponibilité en acides aminés augmente, après leur administration soit par voie veineuse, soit par voie orale (18).

#### B. Les besoins

Le besoin nutritionnel en protéines est la quantité minimale de protéines qui doit être régulièrement consommée pour assurer l'entretien, le fonctionnement métabolique et physiologique de façon générale pour garantir la santé d'un individu bien portant (10).

Le besoin en acides aminés est également à prendre en compte. Si un acide aminé essentiel a un apport nul ou faible, alors le bilan azoté sera négatif et les besoins ne seront pas couverts. Il est

donc important de varier les sources d'aliments afin de couvrir la totalité des besoins (que ce soit en acides aminés ou en protéines).

L'apport nutritionnel conseillé (ANC) en protéines diffère selon les personnes : enfants, adultes, femmes enceintes, personnes âgées : chacun à des besoins différents. Chez un homme sédentaire en bonne santé, les besoins sont estimés à 0,6 à 0,8 grammes de protéines par kg de poids de corps (10,21) en accord avec les recommandations nord-américaines (22) et internationales (23). D'après les données de l'enquête INCA1 (24), l'apport protéique est en moyenne de 1,4g/kg/j. Les besoins sont donc largement couverts dans les pays développés. Les protéines doivent représenter entre 11 et 15% de la ration journalière mais en réalité elles représentent 17% (1,2).

A la différence de l'adulte sédentaire qui cherche juste à maintenir l'équilibre de son bilan azoté, l'objectif du sportif est de gagner de la force et de la masse musculaire et également d'optimiser sa récupération (25). Pour cela, il doit rendre son bilan azoté positif. Ainsi, en plus de combler ses apports en protéines et les fonctions vitales qui en découlent, il doit en consommer plus pour que le surplus puisse être utilisé lors de la croissance musculaire. De plus, l'entraînement physique risque d'induire une augmentation de la sécrétion des hormones qui dégradent les fibres musculaires. Il crée aussi une inflammation générant des cytokines qui s'attaquent aux muscles et aux tendons. Ces facteurs vont continuer à dégrader les protéines durant de longues heures après l'effort. Enfin, les pertes en acides aminés aussi bien urinaires que sudorales sont augmentées par l'exercice (26). Ainsi, selon plusieurs études, la quantité idéale de protéines est d'environ 1,6 grammes par kilo de poids corporel et par jour soit 20 à 25% des apports journaliers totaux (27–32). Certains auteurs conseillent même 2 à 3 g/kg/j pour les sportifs de force mais des apports supérieurs (à partir de 3,5 g/kg/j) ne présentent aucun bénéfice, le surplus étant transformé en résidu graisseux lors du catabolisme protéique. Les périodes d'apport protéique important ne

doivent pas être trop prolongées (6 mois par an) et les deux tiers de l'apport doivent être réalisés par une alimentation équilibrée, le dernier tiers peut être apporté par des suppléments.

## IV. Les sources de protéines

On distingue deux sources principales de protéines : les protéines d'origine animale et les protéines d'origine végétale (tableau 2).

Les protéines d'origine animale proviennent des viandes, des poissons, des œufs, des produits laitiers. Les protéines d'origine végétale proviennent quant à elles des céréales, des oléagineux et des légumineuses : cacahuètes, amandes, pistaches, tofu, haricots, lentilles... Les protéines d'origine animale sont relativement riches en acides aminés indispensables et ont une meilleure digestibilité que les protéines d'origine végétale. Les protéines issues du végétal sont souvent dites de moins bonne qualité car elles sont moins riches en certains acides aminés essentiels (la lysine pour les céréales, et les acides aminés soufrés pour les légumineuses). Il est ainsi important de varier les sources de protéines afin d'avoir un apport le plus diversifié et complet possible.

<b>Aliment</b>	<b>Quantité de protéines pour 100g</b>
<b>Steak haché 5% de matière grasse</b>	25,5g
<b>Saumon cuit à la vapeur</b>	20,8g
<b>Cabillaud</b>	23,1g
<b>Jambon</b>	20,3g
<b>Escalope de dinde</b>	24,6g
<b>Œuf cru</b>	12,7g
<b>Tofu</b>	9,9g
<b>Escalope végétale ou steak à base de soja</b>	15,5g
<b>Lentilles vertes cuites</b>	10g
<b>Amandes</b>	25g
<b>Quinoa cru</b>	14g

*Tableau 2 : teneur en protéines de certains aliments (33)*

## V. La qualité des protéines

La détermination de l'efficacité d'une protéine se fait en déterminant sa qualité et sa digestibilité (tableau 3). La qualité fait référence à la disponibilité des acides aminés qu'elle fournit, et la digestibilité considère la meilleure façon d'utiliser la protéine.

### 1. La valeur biologique et l'indice chimique

La valeur biologique et l'indice chimique expriment le pourcentage d'acides aminés par gramme de protéine alimentaire qui sera utilisé pour la synthèse protéique de l'organisme. Il s'agit du rapport le plus faible entre la quantité de chaque acide aminé essentiel présent dans la protéine analysée par rapport à une protéine de référence. L'échelle s'étend de 0 à 100 ; 100 définissant la meilleure qualité de la protéine. L'œuf est l'aliment qui fournit le mélange optimal en acides aminés essentiels. Les sources végétales ont des valeurs biologiques plus faibles car elles ne contiennent pas tous les acides aminés essentiels. Pour le calcul, il faut disposer de l'aminogramme de la protéine afin d'y trouver l'acide aminé limitant.

La valeur biologique ne prend pas en considération plusieurs facteurs clés qui influencent la digestion des protéines et l'interaction avec d'autres aliments avant l'absorption.

### 2. Digestibilité et vitesse de biodisponibilité (tableau 3)

L'indice de digestibilité correspond à l'indice chimique de l'AA le plus limitant corrigé par la digestibilité de la protéine (lait de vache ou œuf : 100% ; pois : 70% ; blé : 34%) (34). On le nomme PDCAAS (protein digestibility-corrected amino acid score) ou SCCD (score chimique corrigé de digestibilité).

Type de protéine	Ratio d'efficacité des protéines	Valeur biologique	Utilisation nette de protéines	SCCD
Bœuf	2,9	80	73	0,92

<b>Caséine</b>	2,5	77	76	1,00
<b>Œuf</b>	3,9	100	94	1,00
<b>Lait</b>	2,5	91	82	1,00
<b>Protéine de soja</b>	2,2	74	61	1,00
<b>Gluten de blé</b>	0,8	64	67	0,25
<b>Protéine de lactosérum</b>	3,2	104	92	1,00

*Tableau 3 : classement de qualité des protéines (35,36)*

## VI. Les dangers d'une consommation en excès de protéines

Les conséquences physiologiques à moyen et long termes d'une augmentation de l'apport en protéines sont encore mal connues. D'une part, les études expérimentales qui portent sur l'ingestion chronique d'un régime à teneur élevée en protéines sont en général d'une durée limitée et ne permettent pas de se prononcer sur les effets à très long terme de régimes riches en protéines. D'autre part, les facteurs de confusion dans les études épidémiologiques en limitent l'interprétation et la mise en évidence de certains liens de causalité.

Il est également important de distinguer un régime hyper protéiné et un apport excessif en protéine ( $> 3\text{g/kg/jour}$ ). Le rapport de l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) (10) avait conclu qu'il n'y avait pas d'éléments montrant un risque sanitaire lié à des apports élevés, jusqu'à 3 fois l'ANC. Par ailleurs, le rapport de l'IOM (Institute Of Medecine) (23) a proposé une limite haute de protéines à 35 % de l'AET (Apport Energétique Total), en l'absence de risques avérés des régimes hyperprotéiques chez l'adulte en bonne santé.

### A. Le déséquilibre acido-basique

Le pH sanguin physiologique est compris entre 7,35 et 7,45. Toute variation en dessous de 7,35 traduit une augmentation de l'acidité du milieu et on parle alors d'acidose ; alors qu'une que des valeurs supérieures à 7,45 correspondent à une alcalose. Les aliments ont une influence sur l'équilibre acido-basique. On peut évaluer le degré acidifiant ou alcalinisant et donc leur impact sur l'organisme grâce à l'indice PRAL (Potential Renal Acid Loading) (figure 12). En pratique, plus la valeur de l'aliment est négative, plus celui-ci est alcalinisant ; et inversement, plus elle est positive, plus celui-ci est acidifiant. Un état d'acidose engendre une baisse des performances et l'apparition de blessures osseuses ou musculo-tendineuses (tendinites par exemple). Afin d'éviter les variations de l'équilibre acido-basique, il est recommandé d'associer des produits animaux (plutôt acidifiants) et des aliments sources de potassium (généralement alcalinisants) tels que les fruits et légumes ou

des aliments neutres sur le plan acido-basique tels que le lait (exemples : melon/jambon, charcuterie/pomme de terre).

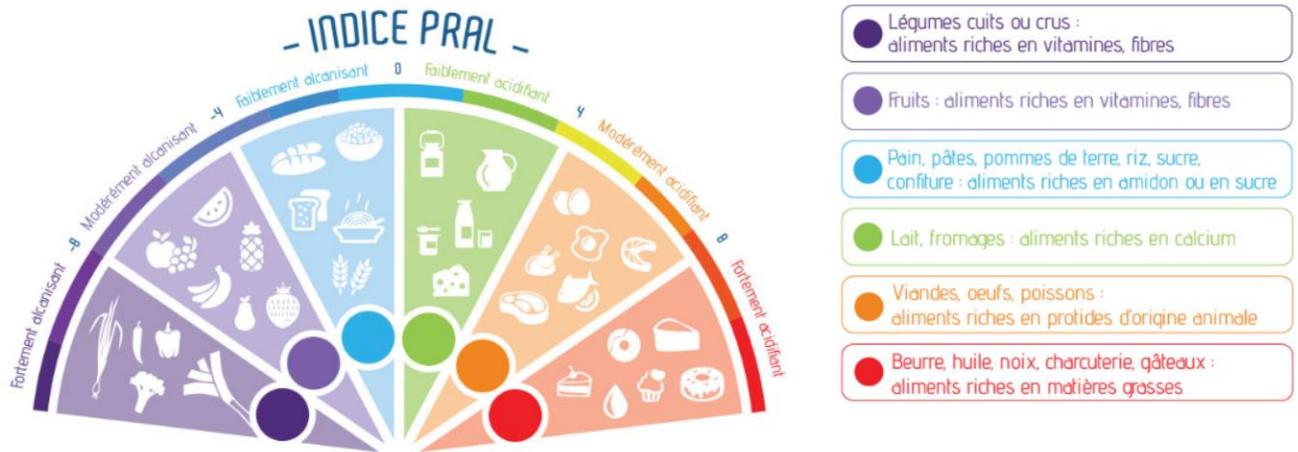


Figure 12 : les aliments et leur indice PRAL (37)

## B. Les troubles osseux et de l'homéostasie calcique

Les régimes riches en protéines sont associés à une augmentation de l'excrétion urinaire de calcium. Les acides aminés à base de soufre (retrouvés dans les protéines animales principalement) sont une cause d'hypercalciurie. Le mécanisme derrière cela est probablement lié à l'augmentation de la sécrétion d'acide due à la consommation élevée de protéines. Si les reins sont incapables d'amortir les niveaux élevés d'acide endogène, d'autres systèmes physiologiques devront compenser, comme les os. Le calcium (substance alcaline) est libéré des os pour amortir les niveaux d'acide élevés et rétablir l'équilibre acide-base.

Cependant, cette perte est compensée par une augmentation de l'absorption du calcium par l'intestin (38) et ainsi les variations de la charge acide n'influenceraient pas la balance calcique. Au contraire un apport bas en protéines (moins de 0,8 g/kg) est associé à une mauvaise absorption du calcium (39). Chez les personnes âgées, l'augmentation de l'apport en protéine d'origine animale se traduit par une hausse du niveau de l'IGF-1, hormone favorable au renforcement osseux. Cette

augmentation de l'IGF pourrait expliquer l'impact favorable des protéines sur l'homéostasie osseuse (39,40). Chez des femmes jeunes ayant une consommation de calcium satisfaisante et suivant un programme de musculation, un apport protéique de 2,4g/kg de poids corporel durant 10 jours n'induit aucun effet délétère sur l'intégrité osseuse (41) .

### C. Les troubles de la fonction hépatique

Le foie peut se retrouver agresser car il devra oxyder un fort taux de protéines. En effet, à partir d'un seuil, les protéines ne serviront plus aux synthèses mais seront oxydées en urée puis éliminées. Le foie a pour mission de transformer l'ammoniaque (produit toxique du catabolisme protéique) en urée dans le but que celle-ci soit excrétée par la fonction rénale via le flux sanguin après filtration. Cette action peut à terme fatiguer la capacité d'épuration du foie. Cependant aucune preuve scientifique ne vient étayer cette affirmation.

### D. Les troubles de la fonction rénale

L'une des croyances populaires les plus connues à propos des protéines est celle concernant le risque pour les reins. En effet, la majeure partie des études mentionnant un risque, ont été effectuées chez des animaux ou chez des patients atteints d'une pathologie rénale. De ce fait, il est impossible d'extrapoler ces résultats à des individus en bonne santé ne souffrant d'aucune pathologie rénale. De plus, cette croyance prend son origine de pratiques révolues actuellement, utilisant des anciens régimes hyper protéinés associés à un apport hydrique limité sur des périodes longues.

Les fonctions principales des reins sont l'élimination des déchets issus des divers métabolismes, l'élimination d'éventuelles substances toxiques et le maintien de l'équilibre hydroélectrolytique. La consommation de protéines engendrent des déchets : urée, acide urique, créatinine. Ainsi, une consommation excessive de protéines augmentera ces déchets et donc leur élimination par le rein. L'apport hydrique devra être important afin de diluer les déchets métaboliques pour en faciliter l'élimination.

Les quelques cas recensés d'apports protéiques associés à des dysfonctionnements rénaux mettent en jeu des facteurs indirects comme des prédispositions génétiques, le manque d'apport hydrique, une diminution d'apport des autres macronutriments.

Par exemple, dans une étude sur des culturistes consommant un régime riche en protéines (2,8 g/kg), aucun changement négatif n'a été observé dans les tests explorant la fonction rénale (42). De nombreuses études confirment ces données (43,44). Cependant, chez les personnes ayant une maladie rénale existante, il est recommandé de limiter l'apport en protéines (0,8 g/kg/j).

Pour prévenir certains de ces troubles, des régulateurs de pH peuvent être utilisés préventivement (par exemple les sels de citrates pour les sportifs sujets aux calculs rénaux). En règle générale, plus l'apport en protéines est important, plus la consommation d'eau doit l'être aussi.

LES MUSCLES : ANATOMIE ET  
PHYSIOLOGIE

Chez l'Homme, on distingue trois types de tissus musculaires (figure 13) en fonction de leurs structures, de leurs propriétés contractiles et de leurs mécanismes de contrôle : le muscle lisse, le muscle strié squelettique, et le muscle strié cardiaque.

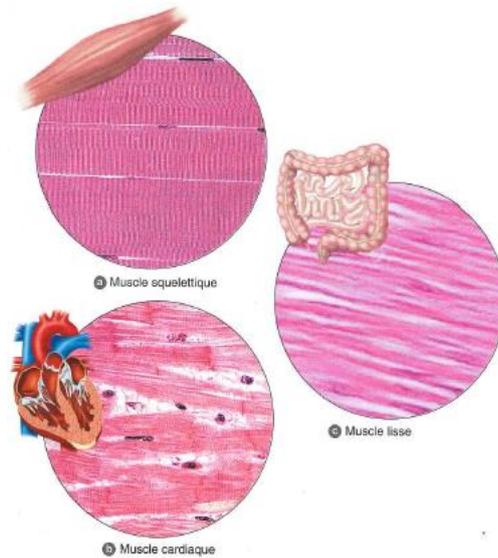


Figure 13: les trois types de tissus musculaires (16)

Le muscle strié squelettique est un muscle fixé directement aux os du squelette et son rôle est à la fois de maintenir la posture et de déplacer les membres en se contractant. Le muscle strié cardiaque est le muscle du cœur, et le muscle lisse est le muscle qui tapisse les vaisseaux sanguins et les organes creux de l'organisme. L'ensemble de ces trois types de muscles représente environ 50% du poids du corps et la plus grosse partie est constituée par les muscles squelettiques (environ 40% du poids total du corps).

Nous aborderons ici les muscles que nous contrôlons consciemment et que les sportifs cherchent à travailler et améliorer : les muscles squelettiques. Le corps humain contient plus de 600 muscles squelettiques. Ils peuvent être subdivisés en différents groupes suivant leur typologie : les muscles longs (exemples : biceps brachial, quadriceps fémoral), les muscles plats (exemples : le grand pectoral, le muscle droit de l'abdomen), les muscles courts (exemple : le court adducteur), les muscles circulaires (exemples : les muscles orbiculaires).

# I. Organisation des muscles striés squelettiques

Les muscles squelettiques (figure 14) sont fixés sur les os par l'intermédiaire de faisceaux de fibres de collagène, les tendons. Certains tendons sont très longs, avec leur site d'insertion sur l'os situé très à distance de l'extrémité du muscle.

Le terme muscle fait référence à plusieurs faisceaux musculaires qui se divisent eux-mêmes en plusieurs fibres musculaires. Les fibres musculaires sont attachées ensemble par une couche de tissu conjonctif appelé épimysium. Contrairement à la majorité des cellules de l'organisme, la cellule musculaire appelée myocyte possède plusieurs noyaux. Une fibre musculaire est constituée de plusieurs myofibrilles. Dans ces myofibrilles (figure 15), on retrouve de nombreux filaments fins et épais qui donnent l'aspect strié aux muscles squelettiques. Les filaments fins et épais de chaque myofibrille se disposent de façon répétitive sur toute la longueur. Une unité unique de cette structure répétitive est appelée sarcomère. Le sarcomère est l'unité fondamentale contractile. Les filaments épais sont constitués pratiquement exclusivement de la protéine myosine et les filaments fins sont essentiellement constitués de la protéine actine ainsi que de deux autres protéines, la troponine et la tropomyosine. Ces protéines jouent un rôle important dans la régulation de la contraction.

En microscopie électronique, on peut voir l'organisation très spécifique des sarcomères qui se décline en deux types de bandes : les bandes sombres appelées A et les bandes claires appelées I. Les bandes A sont constituées des filaments épais et fins et contiennent en leur centre une bande plus claire appelée la bande H qui est elle-même interrompue par une ligne sombre et étroite appelée bande M. Les bandes I contiennent uniquement les parties des filaments fins et chaque bande est divisée par une ligne caractéristique appelée strie Z.

L'espace entre les filaments fins et épais qui s'entremêlent est occupé par des projections appelées ponts transversaux. Ce sont des parties des molécules de myosine qui s'étendent vers les

filaments fins. Pendant la contraction musculaire, les ponts transversaux entrent au contact des filaments fins sur lesquels ils exercent une force.

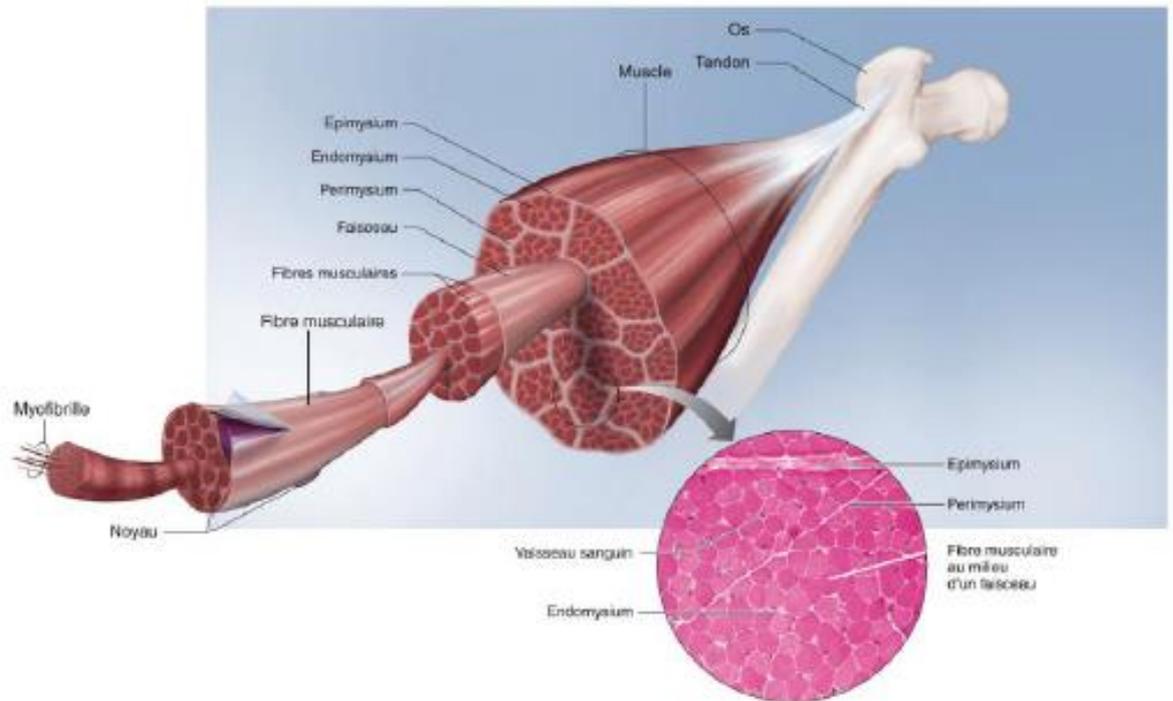


Figure 14 : structure de base d'un muscle squelettique (16)

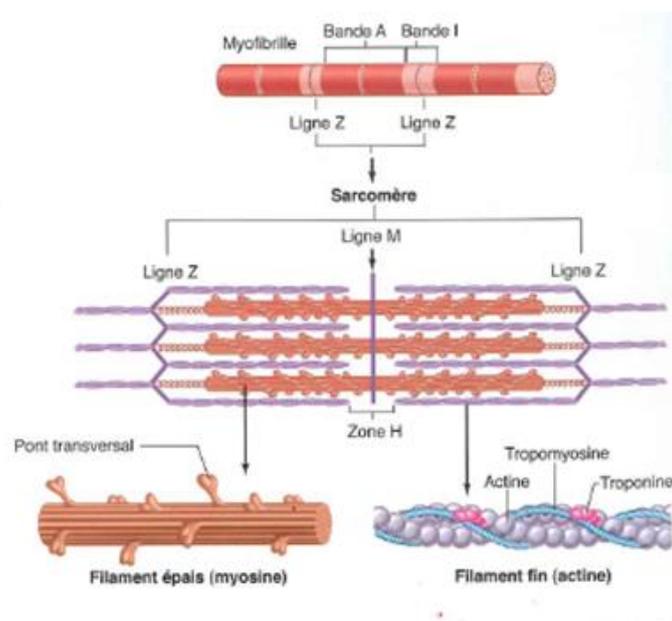


Figure 15 : structure d'une myofibrille (12)

## II. Les fibres musculaires

Chez l'Homme, les fibres musculaires ne sont pas toutes identiques au sein d'un même muscle. Le muscle n'est donc pas un tissu homogène puisqu'il est constitué de fibres dont les propriétés mécaniques, enzymatiques et énergétiques sont différentes. On distingue trois principaux types de fibres (tableau 4).

Les fibres musculaires de type I sont des fibres rouges de petite taille. Elles possèdent un réseau capillaire très dense. Elles sont riches en mitochondries, qui correspondent aux « centrales énergétiques » de l'organisme. Elles ont une activité tonique de petite puissance mais pour une longue durée, elles se contractent donc lentement mais sont très résistantes à la fatigue. Elles sont principalement sollicitées pour un métabolisme aérobie oxydatif et sont donc nommées fibres oxydatives ou « fibres de l'endurance » : elles sont ainsi adaptées aux efforts longs et en condition aérobie tels que le marathon, ou le ski de fond.

Les fibres musculaires de type IIa sont des fibres de couleur et de taille intermédiaires. Elles ont une activité tonico-phasique, ce qui leur permet de se contracter rapidement et d'être résistantes à la fatigue. Elles présentent une bonne capacité anaérobie et aérobie, elles sont donc communément appelées fibres intermédiaires.

Les fibres musculaires de type IIb sont des fibres blanches et de grande taille. Elles sont caractérisées par une activité physique de grande puissance mais de courte durée, elles se contractent donc très rapidement mais sont également très fatigables. Elles sont riches en glycogène mais pauvre en mitochondries, elles seront principalement sollicitées pour un métabolisme anaérobie et sont donc nommées fibres glycolytiques. Ces fibres à contraction rapide sont adaptées aux efforts brefs et intenses, en anaérobie, tels que le sprint ou l'haltérophilie.

La répartition des différents types de fibres est génétiquement définie. Cependant, il est possible avec un entraînement spécifique de voir apparaître des modifications dans la structure musculaire. L'exercice aérobie qui est de faible intensité mais de durée prolongée (l'endurance par exemple)

provoque une augmentation du nombre de mitochondrie dans les fibres ainsi qu'une augmentation du nombre de capillaires autour de ces fibres. Inversement, un exercice anaérobie de durée brève mais d'intensité forte (le culturisme par exemple), provoque une augmentation du diamètre de ces fibres (hypertrophie) ainsi qu'une augmentation de l'activité glycolytique.

	<b>Type I</b>	<b>Type IIa</b>	<b>Type IIb</b>
<b>Vitesse de contraction</b>	Lente	Rapide	Rapide
<b>Résistance à la fatigue</b>	Elevée	Modérée	Faible
<b>Fibres actives dans les efforts</b>	Endurance	Puissants, prolongés	Explosifs
<b>Capacité à utiliser les graisses</b>	Elevée	Intermédiaire	Très faible
<b>Capacité à utiliser les sucres</b>	Faible	Intermédiaire	Elevée
<b>Réserve d'énergie principale</b>	Triglycérides	Créatine et glycogène	Créatine et glycogène

*Tableau 4 : Principales caractéristiques des fibres musculaires*

### III. La contraction musculaire (45-47)

La contraction musculaire est le résultat de la transformation d'énergie chimique en énergie mécanique. Une cascade d'évènements partant d'un potentiel d'action permet la contraction musculaire.

La première étape correspond à l'excitation musculaire induite par l'arrivée du message nerveux sur la fibre. La membrane nerveuse va alors se dépolariser induisant l'ouverture de canaux calciques voltages-dépendants. Le flux de calcium à l'intérieur de la terminaison axonale déclenche la libération de l'acétylcholine dans la fente synaptique. L'acétylcholine diffuse dans cette fente et va se lier à des récepteurs spécifiques situés au niveau de la membrane post-synaptique. Cette fixation augmente la perméabilité aux ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) et potassium ( $\text{K}^+$ ). L'ouverture avec l'entrée des ions sodium entraîne la dépolarisation locale de la membrane post-synaptique musculaire. Le potentiel de plaque excitateur ainsi généré va provoquer la naissance d'une vague de dépolarisation propagée sur tout le sarcolemme (membrane plasmique musculaire) correspondant à un potentiel d'action musculaire (figure 16).

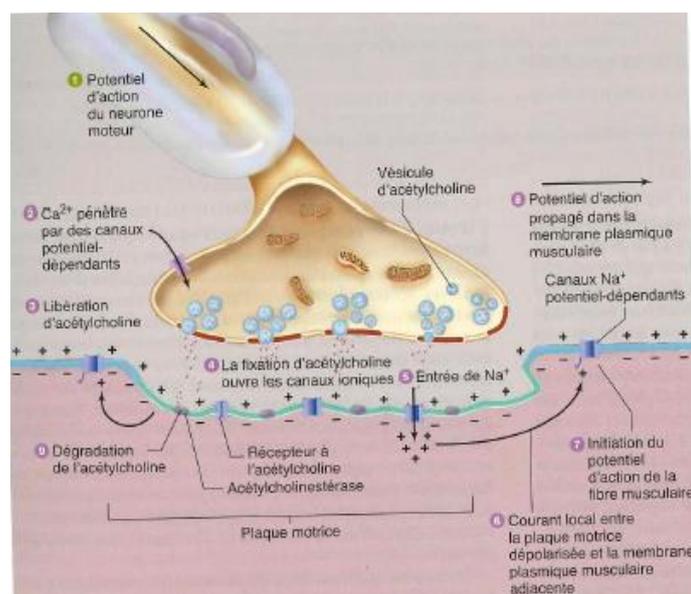


Figure 16 : évènements survenant à la jonction neuromusculaire et aboutissant à un potentiel d'action dans la membrane plasmatique de la fibre musculaire (12)

Le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) présent au niveau du réticulum sarcoplasmique va alors être libéré dans le cytoplasme cellulaire. C'est l'étape du couplage excitation-contraction qui correspond à l'ensemble des phénomènes permettant de transformer le signal nerveux en un signal intracellulaire vers les fibres contractiles.

Vient ensuite l'étape de la contraction musculaire proprement dite. Le calcium libéré du réticulum sarcoplasmique se fixe sur le système troponine-tropomyosine. Alors que celui-ci empêche habituellement l'interaction entre l'actine et la myosine, l'arrivée du calcium lui fait perdre son pouvoir inhibiteur (figure 17).

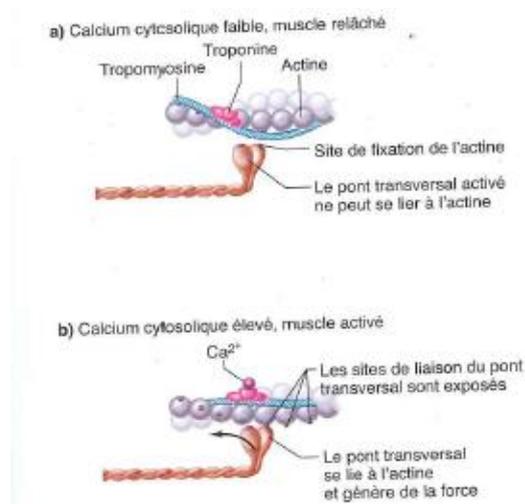


Figure 17 : Activation du cycle des ponts transversaux par le calcium (12)

Au repos, l'actine et la myosine sont non liées et la myosine est couplée à une molécule d'ADP et du phosphate inorganique (Pi). Après démasquage des sites de liaison de la myosine portés par l'actine en présence de calcium, les têtes de myosine vont se lier à l'actine. Le départ du phosphate inorganique, puis de l'ADP, va stabiliser la liaison actine-myosine et entraîner un changement de conformation de la myosine. L'angle que fait la tête de myosine avec la queue allongée va diminuer de  $90^\circ$  à  $45^\circ$ . Myosine et actine étant liées, ce changement de conformation va entraîner un mouvement relatif entre filaments fins et filaments épais. La configuration obtenue, stable en

absence d'ATP, est appelée configuration *rigor* car elle est à l'origine de la rigidité cadavérique (*rigor mortis*). La liaison d'une molécule d'ATP sur la tête de myosine entraîne la dissociation de la liaison actine-myosine. Enfin l'hydrolyse de cet ATP en ADP + Pi entraîne un changement de conformation de la myosine : l'angle formé par la tête et la queue de myosine revient à sa valeur initiale (figure 18).

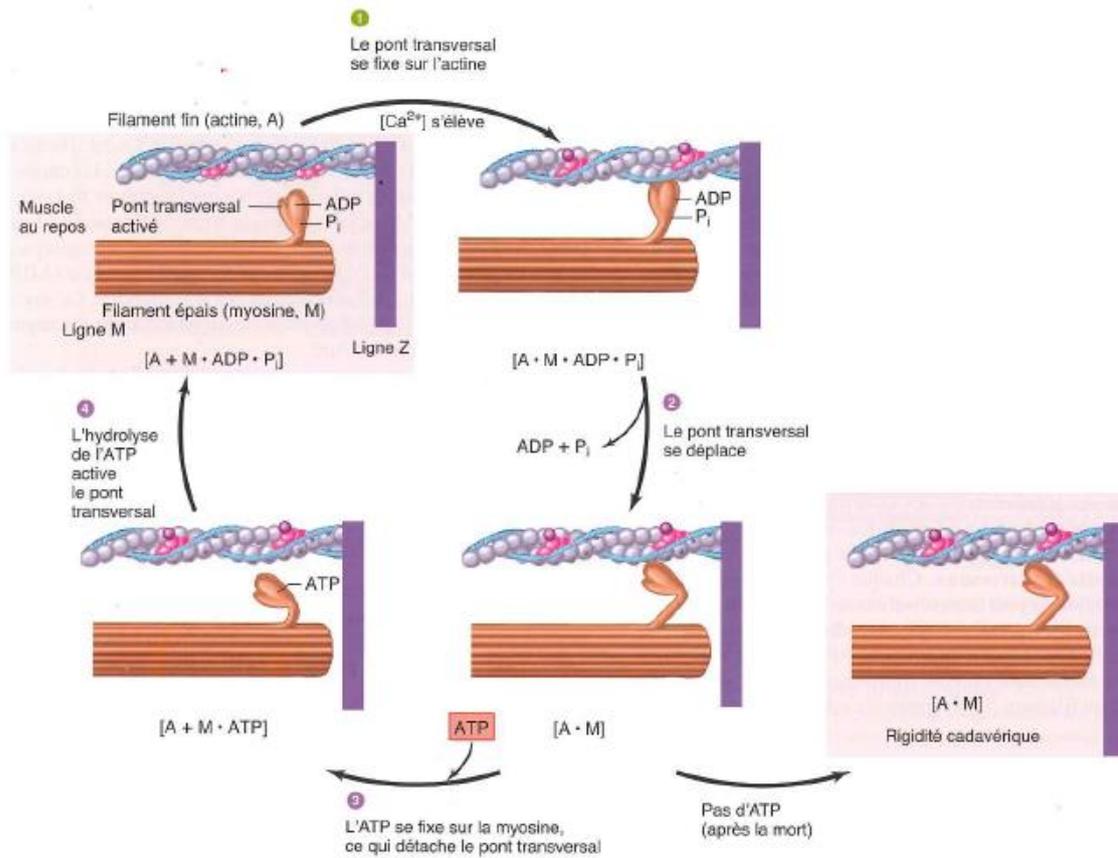


Figure 18 : représentations chimique et mécanique des quatre étapes d'un cycle de pont transversal (12)

Ce phénomène dure tant que la contraction de calcium est suffisante pour inhiber le système troponine-tropomyosine. Lorsque la stimulation nerveuse s'arrête le calcium est re-pompé vers le réticulum sarcoplasmique, le système troponine-tropomyosine reprend son pouvoir inhibiteur. L'actine et la myosine restent alors séparées. C'est l'étape de repos. Il faudra attendre l'arrivée d'un nouveau potentiel d'action que la fibre musculaire puisse à nouveau se contracter.

## IV. L'ATP : monnaie d'échange énergétique

Toute fonction biologique implique la consommation d'énergie. Dans notre organisme, c'est la transformation de l'adénosine triphosphate (ATP) qui fournit l'énergie nécessaire. Le muscle est le plus grand consommateur/transformateur d'ATP de l'organisme.

### A. Définition et rôles

L'adénosine triphosphate (ATP) (figure 19) est constituée d'une molécule d'adénosine, contenant un groupement ribose associé à un groupement adénine, le tout étant lié à trois groupements phosphates constitués d'atome de phosphore et d'oxygène.

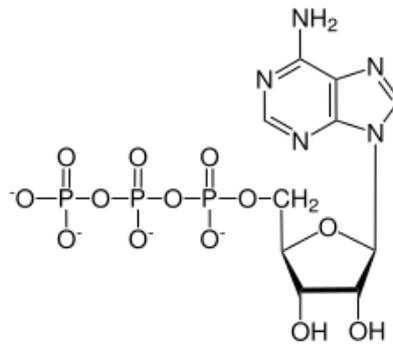


Figure 19 : la molécule d'ATP

La dégradation de l'ATP par l'action de l'ATPase se résume ainsi :  $ATP \rightarrow ADP + P_i + \text{énergie}$ .

Quand une liaison phosphate se brise, elle libère de l'énergie utilisée pour la production d'une force et d'un mouvement (comme au cours de la contraction musculaire), le transport actif de molécules à travers des membranes, la synthèse de molécules organiques utilisées dans les structures et le fonctionnement cellulaire.

Par exemple, les fonctions de l'ATP dans la contraction du muscle squelettique sont les suivantes:

- L'hydrolyse de l'ATP par la myosine active les ponts transversaux, ce qui procure l'énergie pour le développement de la force.

- La fixation de l'ATP sur la myosine dissocie les ponts transversaux liés à l'actine, les ponts pouvant alors répéter leur cycle d'activité
- L'hydrolyse de l'ATP par la  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase du réticulum sarcoplasmique fournit l'énergie pour le transport actif des ions calcium dans le réticulum, ce qui abaisse la concentration du calcium cytosolique à ses valeurs précédant sa libération, achevant ainsi la contraction et permettant la relaxation de la fibre musculaire

Les cellules consomment de l'ATP non pour stocker l'énergie mais pour la transférer : l'ATP est une molécule transporteuse d'énergie qui transfère des quantités relativement minimales d'énergie des molécules énergétiques vers les processus cellulaires nécessitant de l'énergie.

## B. Régulation

La concentration d'ATP reste constante au sein de la fibre musculaire, même lors d'un exercice musculaire intense, il n'y a pas de constitution de réserves en ATP au repos ou lors de la récupération.

L'organisme possède des réserves limitées en ATP dans le muscle (5mmol/kg de muscle) et dont la disponibilité n'excède pas quelques secondes (2 à 4 secondes). L'ATP est stockée en faible quantité puisqu'il s'agit d'une molécule très lourde (la masse d'ATP nécessaire pour boucler un marathon représenterait environ 80 kg, ce n'est donc pas possible de transporter sa masse corporelle ainsi que les 80 kg nécessaires pour avoir assez d'énergie). Les stocks doivent donc être renouvelés rapidement si l'effort est prolongé et ainsi fournir l'énergie chimique nécessaire aux fibres musculaires.

Cette molécule d'ATP est produite dans l'organisme par trois voies énergétiques différentes en utilisant les substrats énergétiques contenus dans nos aliments (glucides, lipides et protéines). Ces voies se mettent en place successivement selon la durée et l'intensité de l'effort : la voie anaérobie alactique, la voie anaérobie lactique, la voie aérobie (figure 20) (tableau 5).

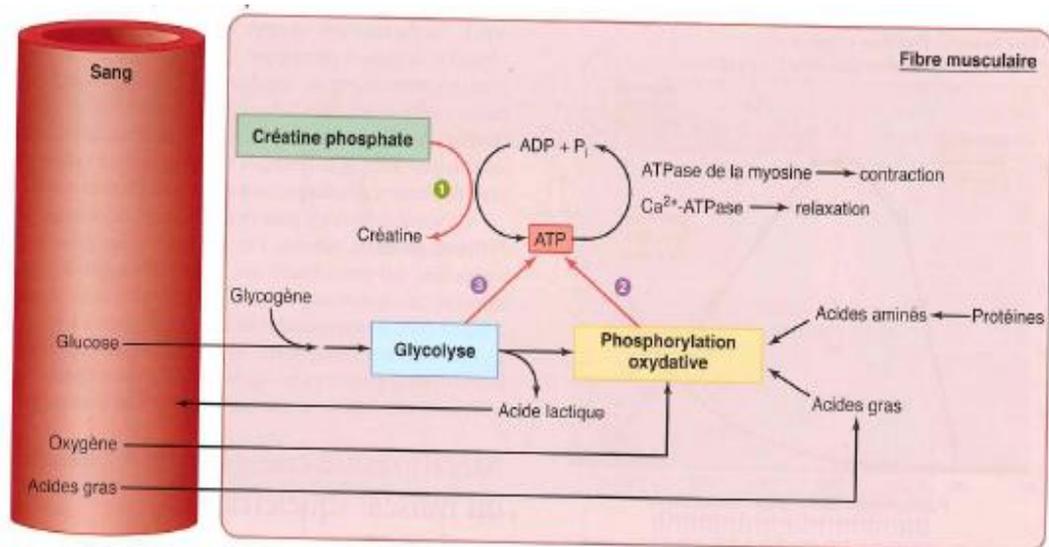


Figure 20 : les trois sources de production d'ATP au cours de la contraction musculaire (12)

	<b>Voie anaérobie alactique</b>	<b>Voie anaérobie lactique</b>	<b>Voie aérobie alactique</b>
<b>Molécules utilisées</b>	Créatine phosphate	Glucose	Glucose, lipides, (protéines)
<b>Délai d'apparition lors d'un effort</b>	Immédiat	20 secondes après le début de l'effort	2 à 3 minutes après le début de l'effort
<b>Puissance</b>	Très élevée (explosivité)	Elevée	Plus faible (fonction du VO2 max)
<b>Durée d'utilisation</b>	20 secondes	2 minutes	Dépendant de la personne et son entraînement
<b>Facteurs limitant la production d'énergie</b>	Epuisement des réserves de créatine phosphate	Production de lactates, acidification	Stock de glycogène, VO2 max, thermolyse

Tableau 5 : les trois filières permettant la production de l'énergie

## V. Les filières énergétiques

### A. Voie anaérobie alactique

Cette voie est utilisée lors des exercices brefs et intenses (sprint, haltérophilie, saut, lancer) qui se déroulent sans oxygène (anaérobie) et sans production d'acide lactique (alactique). Cette filière est également appelée la filière créatine phosphate puisqu'elle utilise les réserves locales de créatine phosphate. En effet, les cellules musculaires disposent de faibles réserves en ATP, mais d'importantes réserves en adénosine diphosphate (ADP) et en phosphocréatine (PCr).

La réaction est la suivante : sous l'action d'une enzyme appelée créatine kinase, la molécule de créatine phosphate se dissocie en créatine et en phosphate. Cette réaction libère de l'énergie qui est utilisée pour resynthétiser l'ATP à partir de l'ADP + P (figure 21).

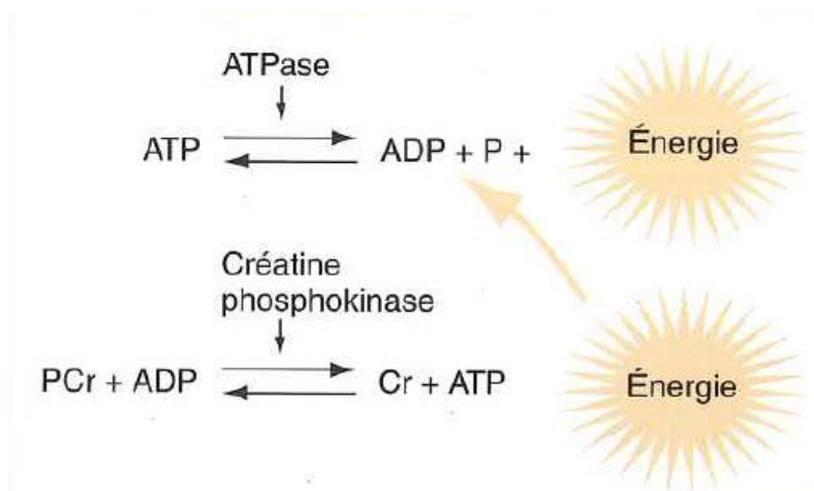


Figure 21 : réaction de la phosphocréatine produisant de l'énergie (8)

Dans ce cas, l'ATP est très rapidement resynthétisé puisqu'une seule réaction est nécessaire pour transférer l'énergie. C'est la raison pour laquelle cette filière est utilisée en début d'exercice quand les besoins énergétiques sont très importants et immédiats. C'est également la raison pour laquelle la puissance dégagée par cette filière énergétique est très importante.

Par contre, la quantité totale de molécules d'ATP resynthétisées est très faible : il n'y a qu'une seule molécule d'ATP resynthétisée à partir d'une molécule de créatine phosphate. Si on est donc capable de développer une très grande puissance grâce à cette filière, elle ne nous permet pas de maintenir l'intensité très longtemps.

## B. Voie anaérobie lactique

Cette voie prend la relève de la filière alactique pour les exercices de courte durée (quelques minutes) et de grande intensité. Cette voie n'a pas besoin d'oxygène (anaérobie) pour métaboliser le glycogène musculaire dans la voie de glycolyse mais elle produit de l'acide lactique. Elle permet les efforts pendant 2 à 3 minutes. Pendant cette phase, les muscles accumulent du lactate et des protons qui contribuent à l'apparition d'une fatigue musculaire.

Dans le muscle, le glucose est stocké sous forme de glycogène. La glycolyse (figure 22) consiste en 10 réactions enzymatiques qui convertissent une molécule de glucose à 6 carbones en deux molécules à 3 carbones (pyruvate). Afin d'amorcer la réaction, le glucose a besoin d'un ATP alors que le glycogène se transforme préalablement en glucose-1-phosphate et se dégrade en glucose-6-phosphate sans apport d'ATP. Le gain net au cours de ces réactions est de 3 molécules d'ATP pour une molécule de glycogène hydrolysée ou 2 molécules ATP pour une molécule de glucose hydrolysée. Cette réaction aboutit à la formation d'acide pyruvique qui en l'absence d'oxygène se dégrade en acide lactique alors libéré sous forme de lactate.

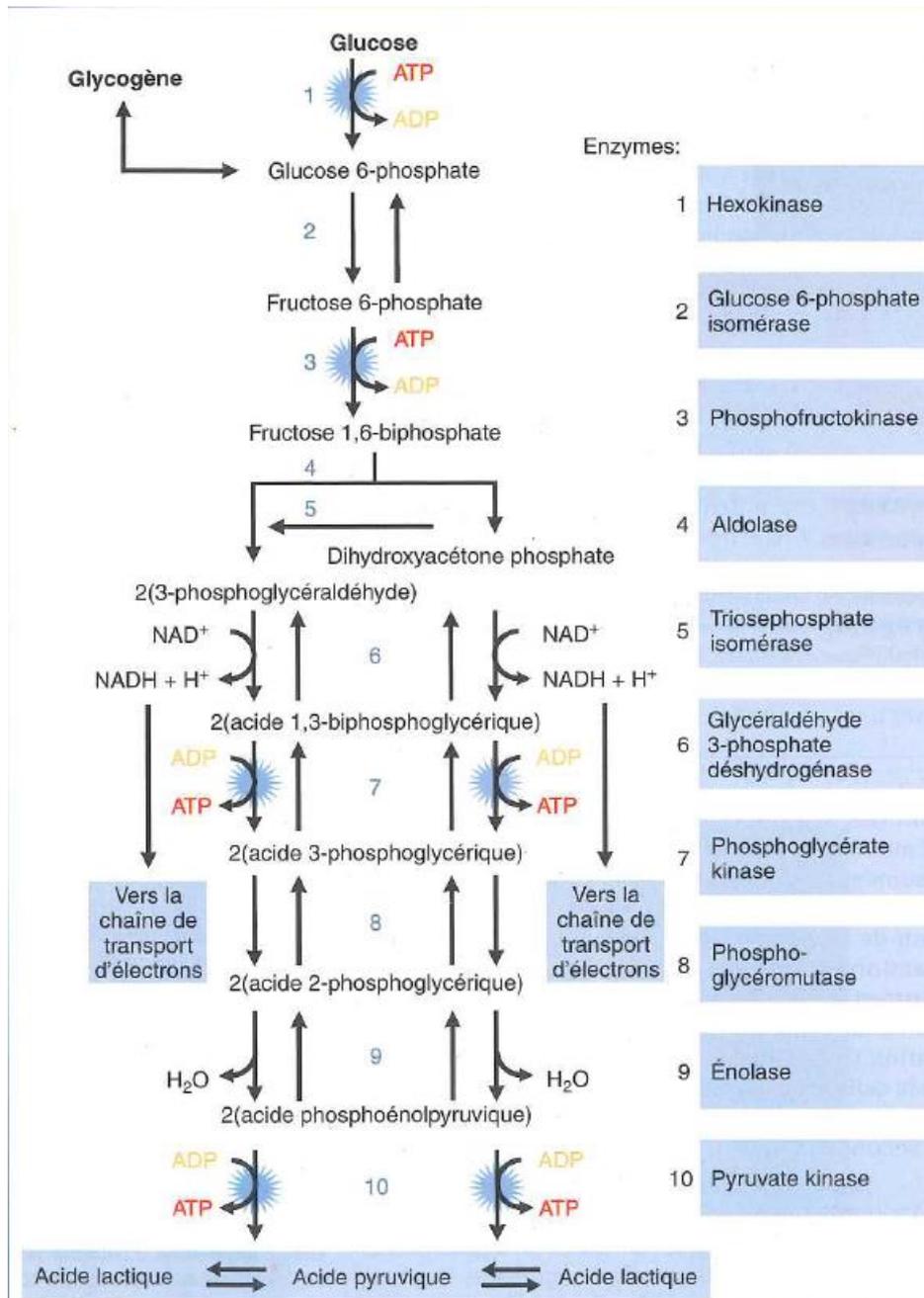


Figure 22 : les différentes réactions biochimiques lors de la glycolyse (8)

La capacité de cette filière est donc plus importante car d'une part on a la production de deux molécules d'ATP à partir d'une molécule de substrat, et d'autre part, le stock de glucose et de glycogène utilisable par le muscle est beaucoup plus important que le stock de créatine phosphate. En revanche, 10 réactions étant nécessaires pour la synthèse, la puissance sera donc beaucoup plus faible que la filière créatine phosphate.

## C. Voie anaérobie

Cette voie est utilisée pour les exercices prolongés ou d'endurance et est mise en jeu dès le début d'un exercice musculaire. Elle peut être efficace pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours dans le cadre des efforts d'ultra endurance. On l'appelle aérobie car elle utilise l'oxygène au sein de la mitochondrie. On l'appelle donc également filière mitochondriale.

### 1. Catabolisme des hydrates de carbone

Lors du métabolisme des glucides, la glycolyse joue un rôle à la fois dans la production aérobie et anaérobie de l'ATP. En elle-même la glycolyse est identique, seule la destinée du produit final, l'acide pyruvique est différente. En présence d'oxygène, l'acide pyruvique est converti en acétyl-Coenzyme A (acétyl-CoA). Une fois formé, l'acétyl-CoA entre dans le cycle de Krebs (figure 23) pour y subir une série de réactions qui permet son oxydation complète. A la sortie du cycle, deux molécules d'ATP ont été formées et le substrat (le glucide) a été dégradé en hydrogène et dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ).

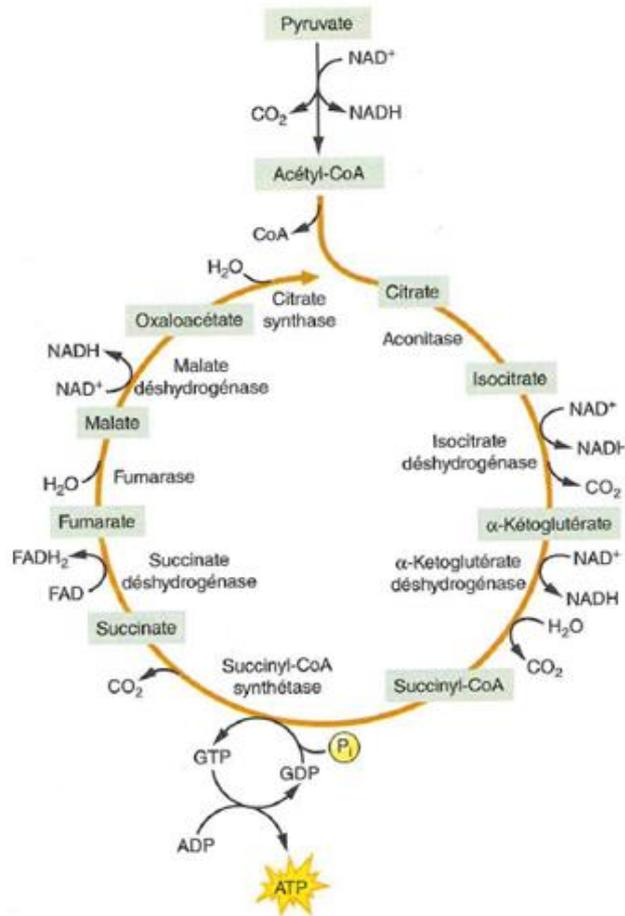


Figure 23 : le cycle de Krebs (16)

Afin d'éviter l'accumulation des ions hydrogènes et une acidification du milieu intracellulaire, le cycle de Krebs est couplé à une série de réactions appelée chaîne de transport des électrons. Les ions hydrogènes sont combinés à deux coenzymes : le Nicotinamide Adénine Dinucléotide (NAD) et le Flavine Adénine Dinucléotide (FAD). Ils vont les transporter vers la chaîne de transport des électrons où ils sont divisés en protons et électrons (figure 24). Les électrons libérés fournissent l'énergie nécessaire à la phosphorylation de l'ADP en ATP. Ce processus est appelé phosphorylation oxydative.

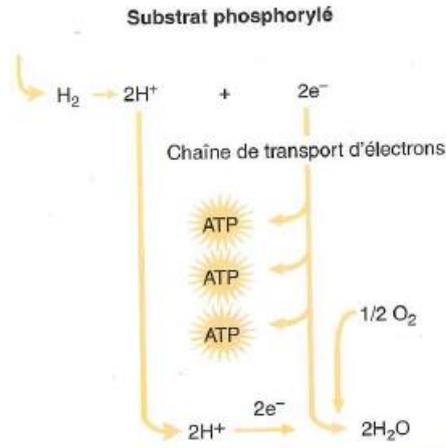


Figure 24 : schéma général de l'oxydation d'atomes d'hydrogène qui s'accompagne d'un transport d'électrons (8)

Le bilan énergétique de ces réactions permet une production nette soit de 36 molécules d'ATP pour un glucose libre, soit de 37 molécules d'ATP pour un glucose provenant de l'hydrolyse du glycogène (figure 25).

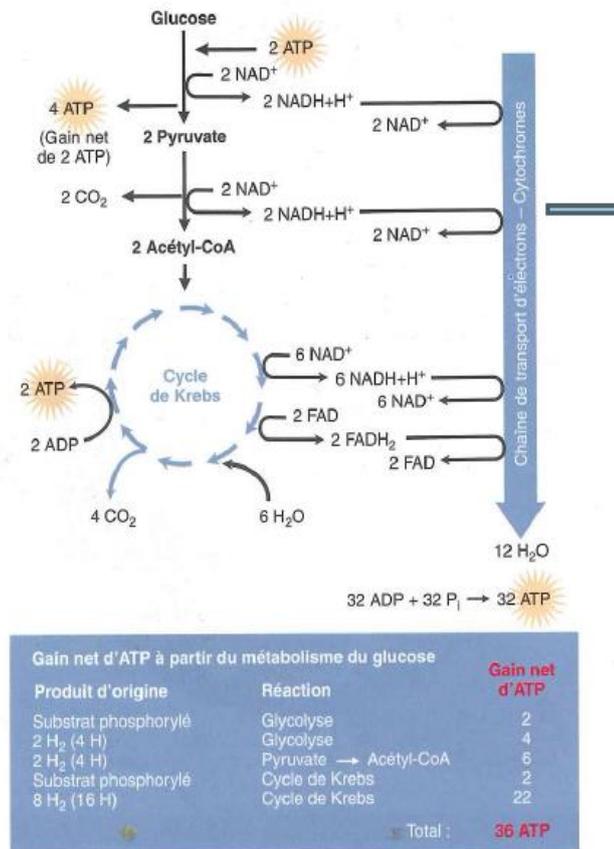


Figure 25 : bilan de la production d'ATP lors de l'oxydation d'une molécule de glucose (8)

## 2. Catabolisme des lipides

Parmi les lipides, seuls les triglycérides permettent de délivrer de l'énergie. La majeure partie des triglycérides est stockée dans le tissu adipeux, le muscle et le foie. Pour être utilisé comme source d'énergie, un triglycéride doit être dégradé en ses composés fondamentaux : une molécule de glycérol et trois molécules d'acides gras libres. Il s'agit du processus de lipolyse fonctionnant grâce à l'action d'enzymes : les lipases. Une fois libérés du glycérol, les acides gras libres passent dans la circulation sanguine et pénètrent dans la fibre musculaire, par diffusion, où ils seront dégradés par des enzymes au sein de la mitochondrie. Ce processus est la  $\beta$ -oxydation aboutissant à la production d'acétyl-CoA qui entre ensuite dans le cycle de Krebs pour y subir une série de dégradation, puis la chaîne de transport des électrons effectue le même processus utilisé pour les hydrates de carbone pour fournir l'ATP.

Ainsi, l'énergie totale produite par le catabolisme lipidique est : 19 molécules d'ATP par molécule de glycérol ainsi que 147 molécules d'ATP pour un acide gras à 18 carbones. Etant donné que chaque molécule de triglycéride contient 3 molécules d'acide gras, leur dégradation permet de synthétiser 441 molécules d'ATP ( $147 \times 3$ ) ; et si on ajoute les 19 molécules d'ATP de la dégradation du glycérol, on obtient 460 molécules d'ATP (figure 26).

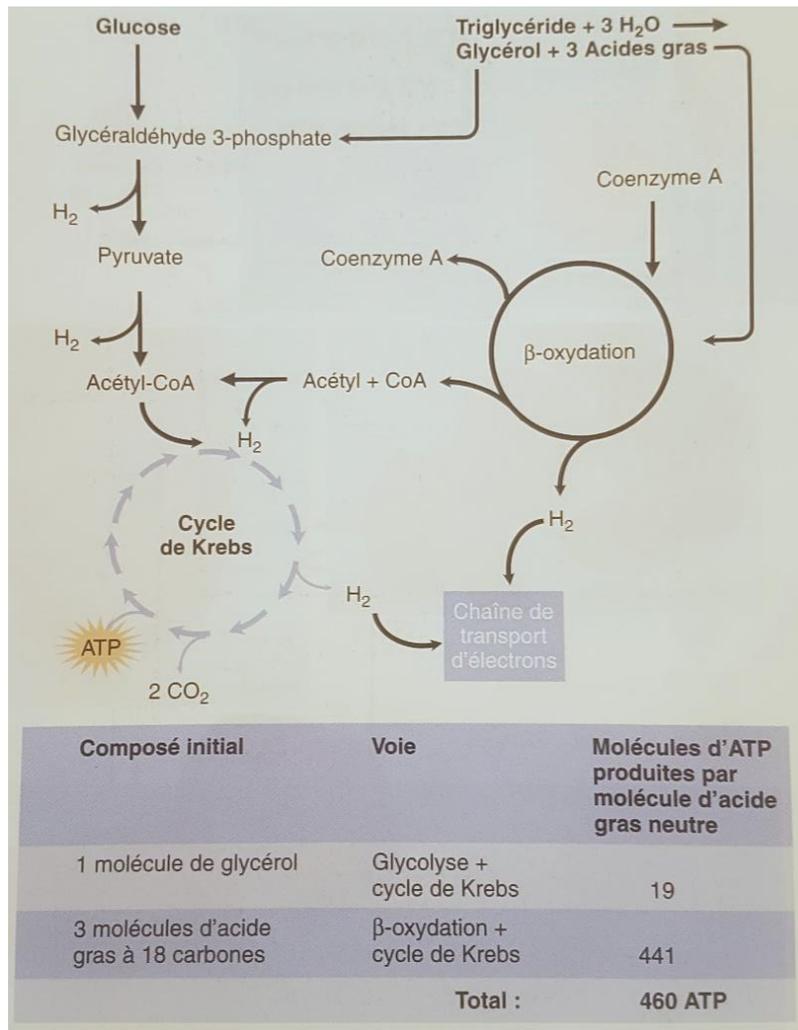


Figure 26 : bilan de la production d'ATP lors du catabolisme d'une molécule de triglycéride

### 3. Catabolisme des protéines

Au cours du catabolisme, les protéines sont tout d'abord dégradées en acides aminés. Puis, au niveau du foie, les acides aminés perdent leur groupement azoté (désamination) et forme de l'urée. Les composés désaminés pourront être utilisés pour former des glucides ou des lipides, ou encore être métabolisés pour fournir de l'énergie. Le muscle squelettique contient également les enzymes capables de transférer la fonction amine des acides aminés vers d'autres composés au cours d'un processus appelé transamination. Dans ce cas, le squelette carboné produit à partir des acides aminés donneurs peut être directement utilisé par le muscle à des fins énergétiques.

Le phénomène d'oxydation des protéines est d'autant plus sollicité que l'intensité et la durée de l'exercice augmentent. La disponibilité en substrats énergétiques glucidiques joue un rôle puisqu'une fois les réserves glycogéniques épuisées, le catabolisme protéique augmente. Les sportifs suivant régulièrement un entraînement éprouvant doivent maintenir leurs réserves protéiques à un niveau optimal.

# LA COMPLEMENTATION

# I. Les compléments alimentaires : définition et réglementation

Jusqu'en 2002, la seule obligation était une demande d'autorisation par le fabricant auprès de la Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF) pour valider les allégations et la composition scientifique du produit. En cas d'absence de réponse de la part de la DGCCRF dans les deux mois suivant la demande, la mise sur le marché de nouveaux produits se faisait automatiquement. De plus, si les composants existaient déjà sur le marché, aucune opposition à leur commercialisation n'était possible. Seul un contrôle *a posteriori* pouvait être effectué par la DGCCRF en cas de doute. Face à l'explosion du marché des compléments alimentaires et l'engouement croissant des consommateurs, de nouveaux produits sont apparus sur le marché de manière désordonnée.

## A. La directive européenne 2002/46/CE

Depuis 2002, la publication de la Directive 2002/46/CE (48) a fourni, aux compléments alimentaires, un cadre réglementaire propre qui leur confère un véritable statut et de fait une reconnaissance européenne.

Ce texte donne la définition suivante pour les compléments alimentaires : « des denrées alimentaires dont le but est de compléter le régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique seuls ou combinés. Ils sont commercialisés sous forme de doses, à savoir les formes de présentation telles que les gélules, les pastilles, les comprimés, les pilules et autres formes similaires, ainsi que les sachets de poudre, les ampoules de liquide, les flacons munis d'un compte-goutte et les autres formes analogues de préparations liquides ou en poudre destinées à être prises en unités mesurées de faible quantité ».

## B. La transposition en droit français

Cette directive a été transposée en droit français par le décret n°2006-352 du 20 mars 2006 (modifié par le décret n°2011-329 du 25 mars 2011) (49) relatif aux compléments alimentaires. Ce décret prévoit une notification obligatoire à la DGCCRF des compléments alimentaires préalablement à leur mise sur le marché, un étiquetage spécifique, des listes positives de plantes et d'autres substances utilisables dans les compléments alimentaires ainsi que les doses journalières maximales pour les nutriments.

Les compléments alimentaires au sens réglementaires du terme (selon la directive précitée) ne sont pas considérés comme des médicaments et ne nécessitent pas d'Autorisation de Mise sur le Marché (AMM).

## C. Les allégations

Les allégations portées par les compléments alimentaires relèvent du Règlement CE n°1924/2006 du Parlement européen et du Conseil qui définit la notion d'allégation de santé, crée les différentes catégories d'allégations et qui précise les modalités de demande et d'évaluation des demandes.

Une allégation est dite :

- Nutritionnelle si elle affirme, suggère ou implique qu'une denrée alimentaire possède des propriétés nutritionnelles bénéfiques particulières
  - Par exemple : « riche en oméga 3 » ou « pauvre teneur en sel »
- De santé si elle affirme, suggère ou implique l'existence d'une relation entre un nutriment ou un aliment et l'état de santé
  - Elle peut revendiquer la diminution d'un facteur de risque : « les oméga 3 réduisent les risques cardio-vasculaires »

L'EFSA (European Food Safety Authority) (50) est chargée de vérifier le bien-fondé scientifique des demandes d'allégations. Ces informations sont ensuite utilisées comme fondement scientifique par la Commission européenne et les Etats membres pour décider s'ils autorisent ou non l'utilisation de ces allégations.

Les allégations nutritionnelles et de santé portant sur les denrées alimentaires sont disponibles sur un registre (51) et la Commission le met à jour si nécessaire, notamment lors de l'adoption de décisions de l'Union européenne aux demandes d'allégation ou aux modification des conditions d'utilisation et de restrictions.

A l'heure actuelle, les conditions prévues par le règlement européen sur les allégations nutritionnelles et de santé (Règlement (CE) n°1924/2006, 2006) sont les suivantes (10) :

- « Source de protéines » : une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est une source de protéines ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si 12 % au moins de la valeur énergétique de la denrée alimentaire sont produits par des protéines.
- « Riche en protéines » : une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est riche en protéines ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si 20 % au moins de la valeur énergétique de la denrée alimentaire sont produits par des protéines.
- « Enrichi en (nom du nutriment) » : une allégation affirmant que la teneur en un ou plusieurs nutriments, autres que des vitamines ou des substances minérales, a été augmentée, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit remplit les conditions applicables à l'allégation "source de" et si l'augmentation de cette teneur est d'au moins 30 % par rapport à un produit similaire.

- « Réduit en (nom du nutriment) » : une allégation affirmant que la teneur en un ou plusieurs nutriments a été réduite, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si la réduction de cette teneur est d'au moins 30 % par rapport à un produit similaire, sauf s'il s'agit de micronutriments pour lesquels une différence de 10 % par rapport aux valeurs de référence fixées par la directive 90/496/CEE est admissible et pour le sodium ou l'équivalent en sel, pour lesquels une différence de 25 % est admissible. »

## D. Un engagement qualité

Alors qu'aujourd'hui bon nombre des produits alimentaires franchissent régulièrement les frontières nationales, des normes internationales sont indispensables pour garantir la sécurité des chaînes mondiales d'approvisionnement en denrées alimentaires (52).

### 1. La norme AFNOR NF 94-001

En France, le risque de consommer un complément alimentaire contenant un produit interdit est faible mais bien réel (53). Depuis 2012, il existe la norme AFNOR (Association Française de Normalisation) NF 94-001 (figure 27) intitulée « prévention du dopage dans le sport – Compléments alimentaires et autres denrées alimentaires destinées aux sportifs – Bonnes pratiques de développement et de fabrication visant l'absence de substances dopantes ». Elle permet de certifier de l'absence de substance interdite (notamment celles répertoriées chaque année par l'agence mondiale antidopage) dans les compléments alimentaires ou autres denrées destinées aux sportifs (54).



*Figure 27 : logo de la norme AFNOR NF 94-001*

## 2. Les autres certifications

Il existe également des labels comme le label SPORT Protect (55) (figure 28) qui garantit de manière tierce et indépendante la conformité des produits avec la norme antidopage NF 94-001. La labellisation couvre ainsi toutes les étapes de production du produit : approvisionnement en matières premières, fabrication, transformation, conditionnement, stockage, expédition.

On le retrouve par exemple sur certains produits du laboratoire Nutergia.



*Figure 28 : logo du label Sport Protect*

Les laboratoires peuvent demander d'autres certifications comme par exemple la certification ISO 22000 qui atteste que l'organisme est conforme aux exigences de la norme ISO 22000 qui portent sur le système de management de la sécurité des denrées alimentaires.

Cette norme a pour objectif d'harmoniser au niveau mondial les exigences en matière de gestion de la sécurité des denrées alimentaires pour les organisations de la chaîne alimentaire (56,57).

Les laboratoires INELDEA, produisant les produits STC nutrition sont certifiés ISO 22000 (figure 29).



*Figure 29 : le logo de la certification ISO (58)*

### 3. Le dispositif de nutrivigilance

Pour renforcer ce cadre législatif, dans une optique de nutrivigilance (59), l'ANSES (Agence Nationale de Sécurité de l'alimentation, de l'environnement et du travail) améliore la sécurité du consommateur en identifiant rapidement d'éventuels effets indésirables liés la consommation des compléments alimentaires, avec des missions d'expertise, de surveillance épidémiologique, d'alerte et de conseil scientifique et technique. Il est possible de déclarer tout effet indésirable sur le site de l'ANSES, mais seuls les professionnels de santé sont habilités à le faire.

### 4. L'Agence Mondiale Antidopage et la lutte contre le dopage

Chaque année, l'Agence Mondiale Antidopage (l'AMA), reprise par l'Agence Française de Lutte contre le Dopage, établit une liste claire des molécules dopantes et de leur interdiction d'utilisation soit en permanence, soit en compétition ou soit dans certains sports uniquement (60).

Toujours dans cette optique d'engagement dans la lutte contre le dopage, qui est d'ailleurs l'une des missions du pharmacien, une convention a été signée en 2015 entre l'Ordre des Pharmaciens et le ministère de la Ville, de la Jeunesse et des Sports. Celle-ci concerne plus particulièrement la

prévention du dopage lié à l'usage de compléments alimentaires chez le sportif amateur ou professionnel. En février 2016, le comité d'éducation sanitaire et sociale de la pharmacie française (Cespharm) qui a pour vocation d'aider les pharmaciens à s'impliquer dans la prévention, l'éducation pour la santé et l'éducation thérapeutique du patient, a alors lancé une grande campagne d'information et de sensibilisation sur ce thème au sein du réseau officinal en proposant sur son site une affiche d'information, une brochure destinée aux sportifs et un document d'information professionnelle (61) (annexe 1).

Du grec « ergon » (énergie) et « genos » (origine), les aides ergogéniques regroupent à la fois les stratégies de préparation physique et psychologique, les aides matérielles, pharmacologiques dopantes et nutritionnelles qui permettent d'augmenter la capacité physique, les performances sportives et la réponse à l'entraînement.

Seules les protéines et la créatine possèdent des allégations validées par l'EFSA quant à l'activité physique. Ainsi, les fabricants peuvent utiliser les allégations suivantes pour les protéines : elles « contribuent au maintien de la masse musculaire » et « à augmenter la masse musculaire ». Quant à la créatine, les fabricants ont l'autorisation d'arguer qu'elle contribue à « augmenter les performances physiques lors d'efforts courts, intenses et répétés, si et seulement si la dose journalière recommandée est de trois grammes de créatine » (50).

De nombreuses études existent pour chacun des compléments alimentaires, cependant les résultats sont très différents et il est ainsi difficile de se positionner. Nous allons tout de même faire une présentation des produits retrouvés sur le marché avec leur(s) potentiel(s) effet(s).

## II. Les différents types de protéines

Ces suppléments se présentent le plus souvent sous forme de poudre à laquelle on ajoute de l'eau ou du lait par exemple. Il est recommandé de satisfaire les apports en protéines pour 2/3 par l'alimentation et pour le tiers restant par des suppléments. L'objectif est de compléter les repas mais en aucun cas ils ne doivent substituer ceux-ci.

Le lait est composé à 80% de caséine et à 20% de lactosérum.

### A. La whey protéine

La whey protéine est un mélange de protéines extraites du lactosérum. Le lactosérum, également appelé « petit-lait », est composé majoritairement (à plus de 90%) d'eau, de sels minéraux, de sucre, de protéines et de très peu de matière grasse (62) Les protéines en poudre sont fabriquées par déshydratation du lait puis extraction des glucides et des lipides à différents degrés afin d'avoir un ratio en protéines le plus important possible.

#### 1. Description et caractéristiques

La whey peut être obtenue à partir de deux matières premières différentes :

- La whey fromagère : c'est la plus couramment utilisée, elle a l'avantage d'avoir un prix bas. Elle est dérivée de déchets issus de la production du fromage. En effet, lors de la fabrication du fromage, le lait est caillé après avoir été pasteurisé. On se retrouve alors avec deux composants : « la caillé » qui est le produit solide qui va servir à la fabrication du fromage et « le lactosérum » qui correspond à la partie liquide jaune-verdâtre. C'est de ce dernier que seront fabriquées les poudres de whey protéine d'origine fromagère. Malheureusement, lorsque des bactéries et de la présure de caillotte de veau ont été ajoutées au lait pour le faire fermenter puis cailler, les acides aminés ont subi une double dégradation.
- La whey laitière : à côté de cette origine fromagère, il existe des whey issues de protéines laitières : ce sont les protéines dites natives. Elles sont directement issues du lait (de vache

en général), sans passer les étapes de confection du fromage. Le niveau de dégradation des acides aminés est donc moindre mais le prix est plus élevé. Elles sont mentionnées sur les étiquettes comme étant des whey bioactives ou natives. Cependant, il faudra veiller à ce que la whey soit non-dénaturée. En effet, pour extraire les protéines, le lait devra subir des transformations mécaniques et chimiques. Pour éviter la dénaturation, il faudra que la pasteurisation soit faite « à froid » (70°C) puis que l'extraction soit la moins agressive possible (filtration ou microfiltration).

Au niveau de l'étiquetage, la différence est assez subtile. Si rien n'est spécifié sur l'étiquette ou si on retrouve « protéines de lactosérum » ou « issu du lait », alors il s'agit très d'une whey fromagère. L'origine laitière étant un argument de qualité, il est mis en avant par les industriels qui mentionnent « protéines de lait ».

L'intérêt de la whey pour les sportifs s'explique par ses propriétés intéressantes : haute valeur biologique, aminogramme complet et rapidité d'assimilation (63). Elle est riche en cystéine (2,45g pour 100g de protéines), en acides aminés branchés (BCAA) (surtout en leucine) mais pauvre en arginine et glutamine.

La whey est dite à assimilation rapide : la diffusion importante et rapide d'acides aminés aux muscles (idéalement dans l'heure qui suit la pratique sportive) active l'anabolisme et donc la reconstruction musculaire ainsi que la récupération (64,65).

## 2. Les différentes formes de whey

En fonction du processus de fabrication, que la whey soit fromagère ou laitière, on obtient différents types de whey :

- Le concentré de whey : c'est la forme la plus simple et la moins onéreuse. Il est produit par filtration chimique, ce qui dénature en partie les protéines. Il contient autour de 80% de protéines sur un extrait sec, le reste étant constitué de glucides et lipides. On retrouve

cependant une proportion importante de lactose susceptible d'engendrer des troubles digestifs.

- L'isolat de whey : il s'agit d'une whey plus filtrée et qui contient une proportion plus importante de protéines et moins importante de lactose. La protéine est ainsi plus rapidement digérée et les acides aminés atteignent donc plus rapidement la circulation générale.
- L'hydrolysate de whey : il s'agit d'une forme partiellement digérée de protéines grâce à des enzymes. Le goût est assez mauvais (et est donc masqué par des arômes artificiels) et le prix est plus élevé. Du fait de la pré-digestion des protéines, les hydrolysats sont plus rapidement assimilés par l'organisme.

### 3. Comparatif des whey protéines

Dans le tableau comparatif suivant (tableau 6), j'ai décidé de prendre l'exemple de deux marques disponibles en officine (et dans d'autres points de vente) mais il existe de nombreuses autres marques disponibles sur internet ou à l'officine. Nous remarquons que l'origine de la whey n'est pas clairement indiquée la plupart du temps. Pourtant cette connaissance est très importante car, comme vu précédemment, elle donne un premier avis sur la qualité de la poudre. La grande majorité des protéines en poudre vendues sont souvent d'origine fromagère. Concernant le prix, la marque Eafit est plus chère alors que la qualité n'est pas la meilleure.

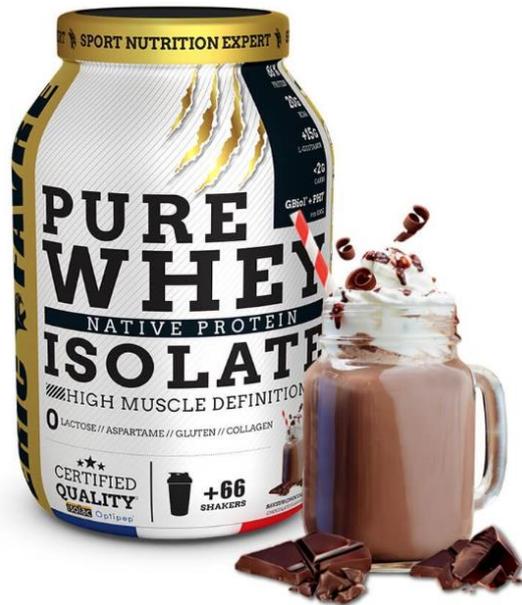
Whey protéines	Descriptions	Prix
	<p>Elle mélange les trois formes : concentrat (42,7%), isolat (36,2%) et hydrolysats (10%) de protéines de lactosérum. L'origine n'étant pas précisée, il s'agit d'une whey d'origine fromagère.</p> <p>On retrouve 76g de protéines pour 100g</p>	<p>35,87€ le kg</p>
	<p>Elle contient uniquement de l'isolat de protéines de lactosérum.</p> <p>L'origine n'étant pas précisée, il s'agit d'une whey d'origine fromagère.</p> <p>On retrouve 81g de protéines pour 100g</p>	<p>43,87€ le kg</p>



Le laboratoire Eric Favre commercialise deux types de whey isolat : l'une d'origine fromagère et l'une d'origine laitière (native). La première contient 25,4g de protéines pour 30g (soit 84,7g pour 100g).

30,95€ le kg

La seconde contient 24,4g de protéines pour 30g (soit 81,3g pour 100g).



On pourrait croire que la première est meilleure étant donnée qu'elle contient plus de protéines, mais pourtant comme vu précédemment, l'origine fromagère dénature les protéines et donc leur assimilation sera moindre

36,45€ le kg

Tableau 6 : tableau comparatif des whey protéines (66,67)

## B. La caséine

### 1. Description et caractéristiques

Il s'agit de la principale protéine issue du lait. Elle est très riche en acide glutamique et en tyrosine, mais elle est peu riche en arginine et cystéine.

Elle est classée parmi les protéines lentes et son assimilation se fait pendant plusieurs heures (figure 30). Elle a la faculté de coaguler. Ainsi, lors de la digestion, ce processus va ralentir

l'absorption des protéines (68). Du fait de cette différence d'assimilation, le niveau plasmatique en acides aminés après la prise de whey est beaucoup plus élevé ainsi l'anabolisme protéique est stimulé tandis que la caséine, du fait de sa digestion plus lente, ne produit qu'un effet modeste sur l'anabolisme mais en revanche elle va permettre de freiner la dégradation des protéines et s'opposer ainsi aux processus cataboliques physiologiques de l'organisme (69). C'est pour cette raison que la whey est à prendre durant la journée tandis que la prise de caséine se fait le soir avant le coucher pour freiner le phénomène catabolique nocturne.

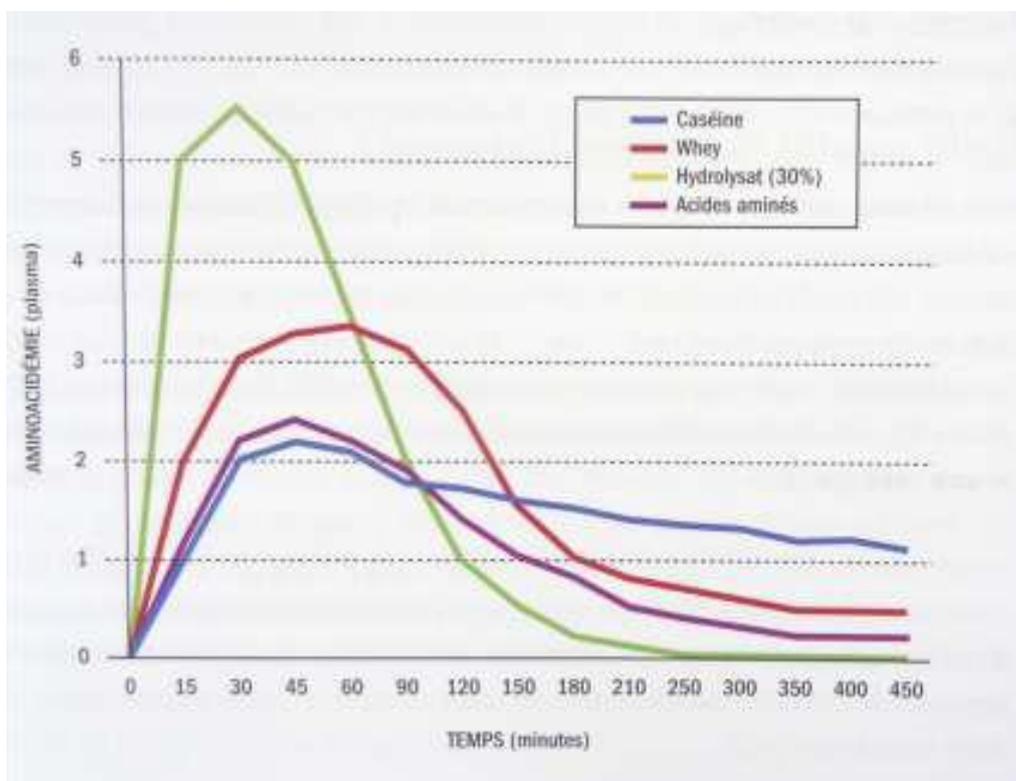


Figure 30 : vitesses d'assimilation des protéines de lait et des acides aminés (70)

Cependant, une protéine dite « rapide » peut devenir « lente » car la vitesse de la vidange gastrique est un paramètre que nous pouvons influencer (ajout de fibres ou de lipides qui ralentissent la vidange gastrique par exemple).

## 2. Les différentes formes de caséine

- La caséinate de calcium/sodium/magnésium : il s'agit de la forme la moins coûteuse. Du fait de son processus d'extraction, les acides aminés présents sont moins bien assimilés. On ne la trouve pratiquement plus sur le marché.
- La caséine micellaire ou protéine totale de lait : les acides aminés sont beaucoup plus faciles à assimiler et la durée d'action est prolongée. Il s'agit de la forme la plus couramment trouvée sur le marché.
- Les hydrolysats de caséine : comme pour la whey, c'est la forme la plus coûteuse puisqu'il s'agit de caséine qui a été prédigérée grâce à des enzymes. De même, l'absorption se fait plus rapidement mais le goût est assez mauvais.

Voici deux exemples de compléments de caséine en poudre des marques Eric Favre et STC nutrition (figure 31) :



Figure 31 : exemple de caséine en poudre (71,72)

La marque Eric Favre propose une poudre avec uniquement de la caséine tandis que la marque STC nutrition propose un mélange de trois sources (caséine micellaire, caséinate et lactosérum). Le fait de combiner les différentes formes serait favorable à l'anabolisme produit par les protéines rapides (lactosérum) et l'action anti-catabolique de la caséine (73).

## C. Les autres protéines

### 1. Les protéines d'œuf

Avant l'arrivée de la whey, les protéines d'œuf représentaient la référence en matière de qualité biologique. Elles sont riches en acides aminés soufrés et en phénylalanine. Leur coût est élevé. Cependant, elles ne sont plus utilisées seules aujourd'hui car leur goût salé ne les rend pas agréables. Le blanc d'œuf liquide (figure 32) conserve cependant une certaine notoriété notamment pour les sportifs dont le système digestif ne tolère pas les protéines de lait. Il contient uniquement des protéines et permet de limiter l'ingestion de jaune d'œuf, plus riche en lipides.



Figure 32 : exemple de produit de blanc d'œuf liquide (74)

## 2. Les protéines de soja

A l'inverse des autres poudres protéinées, la protéine de soja est d'origine végétale ce qui fait d'elle la protéine de prédilection pour les sportifs végétariens ou végétaliens (figure 33). Elle est également utilisée par les personnes intolérantes au lactose.

Le soja est une grande plante originaire d'Asie qui peut atteindre près de deux mètres de haut et qui produit un fruit en forme de gousse dans lequel on retrouve des graines. Ce sont ces dernières qui seront utilisées pour la production des poudres à base de protéines de soja.

La capacité anabolisante de ces protéines est néanmoins moins élevée que celle des protéines issues du lait (75). La prise de masse musculaire est donc moins conséquente mais les isoflavones du soja confèrent à ces produits des propriétés antioxydantes utiles à l'atténuation du catabolisme musculaire et à la récupération physique (76). Les propriétés oestrogéniques du soja protégeraient la masse maigre chez l'athlète féminine. En revanche, une utilisation importante et régulière de ces produits est déconseillée chez l'homme.



Figure 33 : exemple de compléments de protéines de soja (77,78)

L'isolat est le produit protéique de soja le plus raffiné contenant la plus grande concentration de protéines.

### 3. Les protéines végétales

Pour les personnes ne souhaitant consommer ni des protéines d'origine animale, ni des protéines issues du soja, les marques ont développé des compléments avec des protéines végétales. Les sources de protéines sont alors variées : pois, riz, cranberry, spiruline par exemple (figure 34).



Figure 34 : exemple de compléments avec des protéines végétales (79,80)

### 4. Les gainers

Les gainers ne sont pas à proprement parler des protéines mais ce sont des mélanges de protéines et de glucides, parfois de lipides, souvent agrémentés de vitamines et minéraux. Le but de ce type de produit est d'amener un nombre important de calories dans un objectif de prise de poids. Les gainers sont utiles pour les personnes ayant des difficultés à manger suffisamment pour atteindre leur objectif. Cependant ces produits sont rarement recommandables puisque leur teneur

en glucides est souvent très élevée et leur qualité médiocre. L'alternative consiste à fabriquer son propre gainer en achetant les protéines et les glucides séparément.

Pour les sportifs d'endurance, l'association de glucides et protéines augmenterait les performances, protégerait l'intégrité musculaire et accélérerait la récupération (81).

Sur le site de la marque Eafit, on retrouve deux types de gainers (figure 35) : l'un avec une part importante de glucides (71g pour 100g donc 47g de sucres) et l'autre avec un ratio protéines/glucides équilibrés (41g pour 100g dont 5,9g de sucres). Chez des personnes ayant des difficultés à manger et à prendre du poids, ce genre de suppléments peut s'avérer utile mais pour les autres il faudra les utiliser avec prudence étant donné leur taux de sucres rapides. Si une personne a tendance à prendre facilement du poids, il faudrait éventuellement se tourner vers le second contenant moins de sucres.



Figure 35 : exemple de gainers de la marque Eafit (82,83)

Pour faire son gainer soi-même, on peut par exemple mélanger des flocons d'avoine ou de la poudre d'avoine (source de glucides), de la whey protéine ou de la caséine (source de protéines), éventuellement du beurre de cacahouète (source de lipides), avec du lait et/ou de l'eau.

## D. Utilisations

Le recours aux protéines au poudre provient de leur facilité de consommation : elle nécessite seulement la poudre et de l'eau ou du lait. Pour une personne n'ayant pas le temps de faire un repas après sa séance d'entraînement, cela peut donc être une alternative.

Les capacités digestives ne permettent pas l'assimilation de plus de 20 à 30g de protéines par repas, d'où l'intérêt de fractionner ses repas (65). L'avantage de fractionner les repas est également l'apport constant d'acides aminés nécessaires pour l'anabolisme et la réparation tissulaire

De plus, les suppléments protéiques sont pauvres en lipides et en glucides ce qui aura pour conséquence une prise de masse maigre en évitant les abus et les effets indésirables de certaines viandes. En effet, la viande rouge a été classé comme « probablement » cancérigène pour l'homme par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) en 2015 .

### III. Les acides aminés

Les acides aminés participent au métabolisme énergétique lorsque la demande en énergie augmente en réponse à un exercice physique. Lors d'un exercice prolongé, le niveau d'oxydation des acides aminés sera conditionné par la disponibilité des autres substrats énergétiques et notamment les glucides (représentés par la disponibilité en glycogène) ; dans le cas contraire où les réserves glucidiques sont épuisées, la participation du métabolisme protéique sera augmentée, ce qui peut aboutir à une protéolyse musculaire. Un apport protéique alimentaire adapté est alors nécessaire pour combler ce risque de protéolyse. Le but de compléter son alimentation par des acides aminés particuliers est de renforcer son alimentation de manière plus ciblée.

#### A. Les acides aminés à chaînes ramifiées

##### 1. Présentation

Trois acides aminés sont très importants chez le sportif de par leur forte concentration dans les muscles (plus de 30%). De plus, ce sont des acides aminés indispensables : ils ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme et doivent donc être apportés par l'alimentation. Il s'agit des BCAA : Branches Chain Amino Acid (ou AACR pour Acides Aminés à Chaines Ramifiées) (figure 36). On retrouve la leucine, l'isoleucine et la valine. La leucine aurait une action anabolique puissante, les deux autres acides aminés jouant un rôle synergique avec leucine (84–86). Le corps ne peut pas les produire, ils doivent donc être apportés par l'alimentation ou les compléments alimentaires. Ces acides aminés sont reconnus pour améliorer les performances, avoir des effets bénéfiques sur le muscle en diminuant les risques de dommages induits par l'exercice et favoriser la synthèse de protéines musculaires.

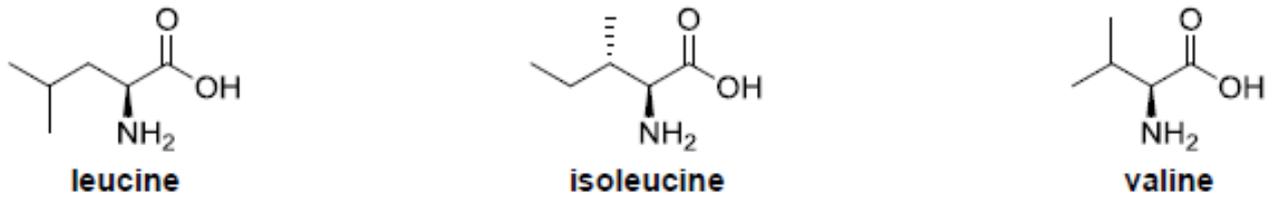


Figure 36 : structure des trois acides aminés à chaînes ramifiées

## 2. Fonctions biologiques

On peut distinguer quatre fonctions biologiques (figure 37)

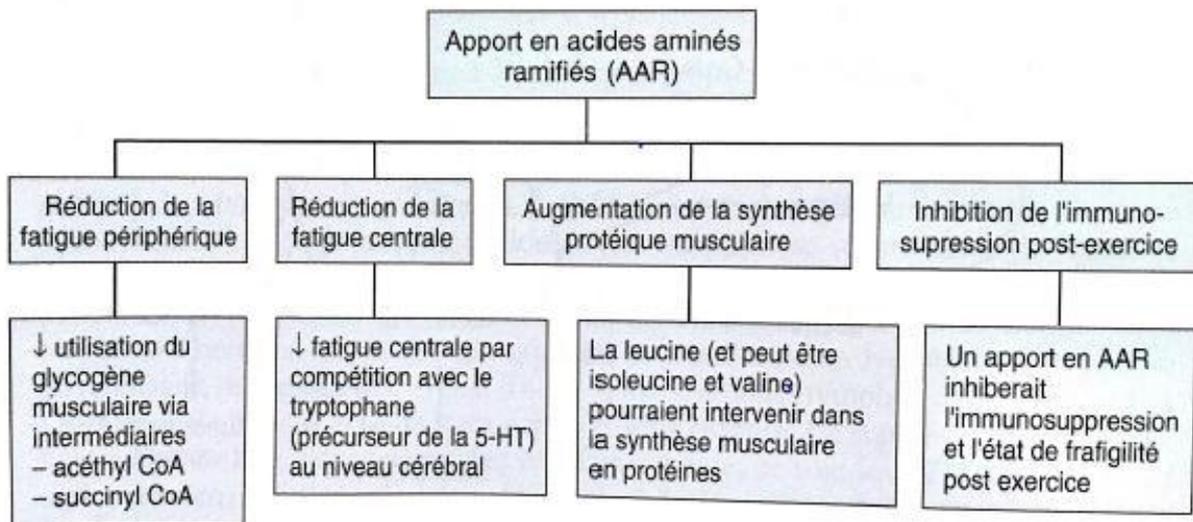


Figure 37 : résumé des effets potentiels attendus des BCAA (87)

- Réduction de la fatigue périphérique

Le métabolisme des trois acides ramifiés se localise principalement dans le tissu musculaire squelettique (figure 38), on y trouve l'ensemble des enzymes spécifiques à leur catabolisme. Il pourrait alors y avoir une diminution de l'utilisation du glycogène musculaire via les intermédiaires de leur métabolisme.

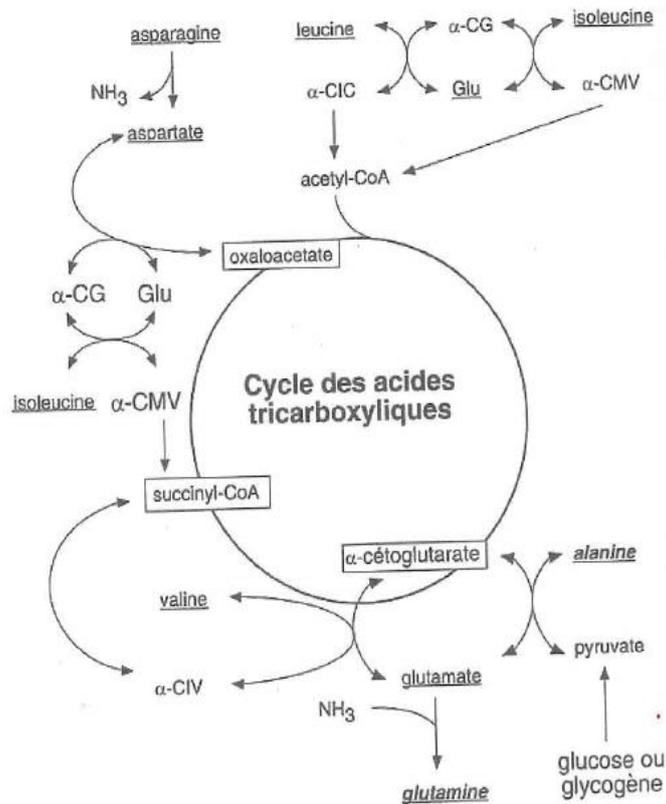


Figure 38 : catabolisme des acides aminés ramifiés au niveau musculaire (4)

- Réduction de la fatigue centrale

Ils amélioreraient également la récupération compte tenu de la compétition entre les BCAA et le tryptophane pour franchir la barrière hémato-encéphalique (BHE) (88,89). Le tryptophane étant le précurseur de la sérotonine (impliquée dans l'induction du sommeil, la réduction de l'excitabilité neuronale, la suppression de l'appétit), il serait à l'origine de l'apparition de la fatigue lors de son entrée dans le SNC (Système Nerveux Central). Lors d'exercices prolongés, les BCAA sont consommés par le muscle et le taux de tryptophane traversant la barrière hémato-encéphalique se retrouve augmenté. Ainsi, tout apport supplémentaire en BCAA permettrait de réduire cette entrée dans le système nerveux, donc la sensation de fatigue et par conséquent améliorer la performance physique. L'apport en petites quantités de BCAA dans les sports de longues durées (entre 1h30 et 3h30), pourrait permettre d'augmenter les performances mentales, mais ces observations restent difficiles à confirmer étant donné la subjectivité interpersonnelle de perception de l'effort.

- Augmentation de la synthèse protéique musculaire

La leucine est une molécule couramment appelée « molécule signal » qui agit sur l'activation de l'anabolisme musculaire à travers la voie mTOR (de l'anglais « mechanistic target of rapamycin »). Une concentration plus importante de leucine dans le sang provoquera une forte augmentation de la synthèse des protéines musculaires et une action directe sur l'initiation de la traduction (90–92).

- Défenses immunitaires

Les BCAA ont également un rôle dans les défenses immunitaires des athlètes via une action spécifique sur le métabolisme de la glutamine. En effet, il semblerait que la supplémentation en BCAA puisse limiter le déclin plasmatique en glutamine retrouvé au cours de l'effort de longue durée et modifier l'immunodépression induite par l'exercice (93–95).

### 3. Exemples et utilisations

Ainsi, les laboratoires commercialisent les BCAA en tant qu'agents impliqués dans la stimulation de la synthèse protéique, en leur attribuant un rôle dans la récupération, et dans l'amélioration des performances mentales au cours de l'effort.

Sur le marché, on retrouve des BCAA 1.1.1, 2.1.1, 4.1.1, 8.1.1, 10.1.1 (figure 39). Ces chiffres représentent le ratio de chaque acide aminé : le premier chiffre représente la leucine, puis le deuxième pour l'isoleucine, puis le troisième pour la valine. Comme détaillé précédemment, la leucine est l'acide aminé le plus important, on le retrouve alors en proportion plus élevée.

Les BCAA peuvent être consommés tout au long de la journée : avant l'entraînement (augmentation des réserves d'acides aminés de l'organisme), pendant l'entraînement (amélioration des performances, maintien d'une concentration sanguine en acides aminés élevée), après l'entraînement (récupération et reconstruction musculaire). Les recommandations sont de 10 grammes par jour.



Figure 39 : exemple de BCAA en gélule et en poudre (96,97)

## B. Le $\beta$ -hydroxy- $\beta$ -méthylbutyrate (HMB)

### 1. Présentation

Le  $\beta$ -hydroxy- $\beta$ -méthylbutyrate (HMB) (figure 40), métabolite biologiquement actif provenant de la dégradation de la leucine, réduirait la perte en protéines à la suite d'un stress en inhibant le catabolisme des protéines (98). Environ 5% de la leucine que nous mangeons serait dégradée en HMB.

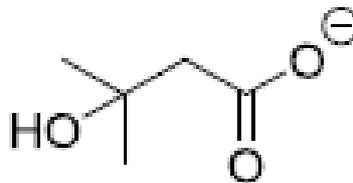


Figure 40 : structure du HMB

### 2. Fonctions biologiques

Il semblerait que les effets bénéfiques potentiels de la leucine soient partiellement associés à sa bioconversion (transamination) musculaire en un métabolite hépatique spécifique : le HMB (99). En effet, selon plusieurs études, le HMB permettrait (avec un entraînement combiné) d'améliorer

la force musculaire, d'augmenter la proportion de masse maigre et aurait tendance à diminuer la masse grasse (100–102). Il induirait la synthèse de protéines via une activation de la voie de transduction mTOR intracellulaire, réduirait la dégradation des protéines via une atténuation du complexe enzymatique ubiquitine-protéasome et stimulerait la différenciation des cellules satellites (cellules souches musculaires) du muscle squelettique via une augmentation de l'expression du facteur de transcription MyoD, augmentant potentiellement *in fine* la capacité de régénération du muscle lésé. En outre, l'HMB pourrait stimuler l'axe GH/IGF-1 (103). Toutefois ces résultats restent controversés par d'autres recherches, et cela, au regard notamment d'une grande diversité de la population étudiée (entraînés vs non-entraînés, âge, type d'exercice, durée de l'entraînement, alimentation, sport pratiqué ...) (104,105). Une méta-analyse publiée en 2015 (106), analysant les études publiées sur les quinze dernières années à propos de l'HMB et de son impact sur les performances sportives, montre une efficacité de la substance dans 12 études sur 13 et pour les sports de force dans 15 études sur 23.

### 3. Exemples et utilisations

L'organisme produit environ 0,2 à 0,4g de HMB suite à la dégradation de la leucine. Les doses recommandées sont de 1 à 3 grammes par jour (figure 41).



Figure 41 : exemple de compléments de HMB (107,108)

## C. La glutamine

### 1. Présentation

La glutamine (figure 42) est un acide aminé non essentiel, il est synthétisé par l'organisme. Cependant, chez le sportif qui s'entraîne régulièrement, la glutamine doit être considérée comme un acide aminé essentiel car la capacité du corps à la synthétiser est largement inférieure à la destruction provoquée par l'effort (109,110). Il s'agit de l'acide aminé le plus abondant de l'organisme (60% des acides aminés libres des muscles). Nos muscles sont responsables d'environ 70% de notre synthèse totale de glutamine (les BCAA servent de précurseurs). Sa biosynthèse est possible à partir du glutamate et de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) grâce à la glutamine synthétase mitochondriale.

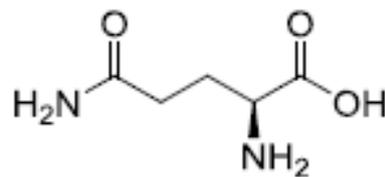


Figure 42 : structure de la glutamine

### 2. Fonctions biologiques

- Défenses immunitaires

La glutamine est un substrat énergétique important pour les cellules immunitaires, il s'agit d'un acide aminé majeur au cours des différentes étapes de la réponse immunitaire. Elle a un rôle de métabolite pour les cellules luttant contre les maladies, en particulier les lymphocytes et les macrophages. Une supplémentation en glutamine pourrait réduire la susceptibilité accrue aux infections (111–113).

- Élimination de l'ammoniaque

L'ammoniaque est formé lors de la dégradation des acides aminés et est un produit toxique pour les cellules. Son élimination tissulaire s'effectue par l'intermédiaire d'une glutamine synthétase qui associe le  $\text{NH}_3$  au glutamate pour former la glutamine.

- Récupération

L'énergie nécessaire à un effort physique est fournie principalement sous forme de glucose aux muscles. Lorsque le glucose sanguin n'est plus présent en quantité suffisante, le foie fournit le glucose qu'il a stocké sous forme de glycogène. Lors de la récupération, la consommation de glutamine en concomitance avec une boisson sucrée (riche en glucose), permet de reconstituer plus rapidement le stock de glycogène hépatique (114).

La glutamine exerce un effet régulateur sur le métabolisme protéique : elle a un effet anti-catabolique. Elle peut par exemple s'opposer à la diminution de la synthèse protéique et à l'atrophie musculaire consécutives à l'utilisation répétée de glucocorticoïdes (115).

Le taux plasmatique de glutamine peut également être un indicateur d'un état de surentraînement car il a été démontré que le surentraînement entraînait une diminution des taux plasmatiques de glutamine nécessitant une récupération prolongée (116).

### 3. Exemples et utilisations

Par voie orale, la glutamine est presque complètement détruite et ne parvient jamais aux muscles. En effet, 90% de la glutamine absorbée est interceptée par l'intestin, le foie et les reins. Ainsi, bien que la glutamine ait pour effet théorique d'améliorer la récupération, en pratique il faudrait en consommer une grande quantité.

Cependant, elle peut être intéressante pour le bien être des intestins. En effet, elle va permettre d'entretenir les fonctions de la paroi intestinale et de la flore. Ainsi, elle peut être indiquée chez le sportif souffrant de troubles digestifs dans l'heure qui suit une séance, ceux-ci étant dus à une perméabilité digestive anormalement accentuée à l'effort.

Sur le marché, elle peut être retrouvée seule (figure 43) ou en mélange avec d'autres acides aminés et les fabricants recommandent une consommation de 5 à 10 grammes par jour.



Figure 43 : exemple de complément de glutamine (117)

## D. L'arginine

### 1. Présentation

L'arginine (figure 44) est un acide aminé non essentiel car, chez le sujet sain, elle peut être synthétisée *de novo* en quantité suffisante par l'organisme. Cependant, les besoins peuvent dépasser les capacités de synthèse endogène dans certaines situations telles que la croissance ou les situations traumatiques (118). Ainsi chez le sportif, l'arginine est considérée comme semi-essentielle.

L'arginine est synthétisée à partir de la citrulline, elle-même provenant de l'acide glutamique ou de la glutamine. La synthèse endogène d'arginine est principalement intestinale et rénale.

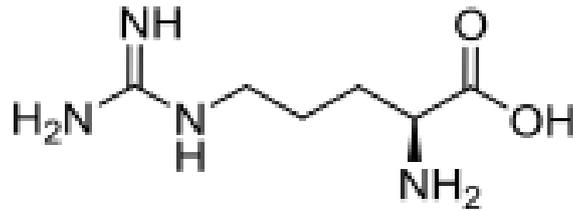


Figure 44 : structure de la L-arginine

## 2. Fonctions biologiques

L'arginine pourrait agir comme anti-fatigue en diminuant la production ou en accélérant l'évacuation de déchets métaboliques, comme l'ammoniaque via le cycle de l'urée, produits en surabondance lors d'un effort (119,120).

L'arginine a un rôle dans la sécrétion de l'hormone de croissance (GH). Elle inhiberait la somatostatine (hormone inhibitrice du relargage de l'hormone de croissance) et entrainerait par conséquence une augmentation du taux de GH (121,122).

L'arginine participe à la synthèse de la créatine en s'associant à la glycine et va donc accroître la force et la récupération.

Enfin, son principal rôle est qu'elle va participer à la synthèse du monoxyde d'azote (NO) en servant de substrat à la NO-synthétase (123). Le NO va favoriser l'oxygénation des muscles en provoquant la vasodilatation des artères. Cet effet vasodilatateur augmente l'afflux sanguin (et donc l'afflux d'oxygène et de nutriments), donne un aspect congestionné au muscle (effet recherché par les sportifs), pourrait diminuer les dommages liés au stress oxydatif en diminuant la prolifération des cellules endothéliales et également diminuer la fréquence cardiaque au cours de l'effort (124).

## 3. Exemples et utilisations

L'arginine peut être commercialisée sous deux formes : la forme base ou la forme base associée à des groupements (comme par exemple à l'acide chlorhydrique formant ainsi le chlorhydrate d'arginine, ou à l' $\alpha$ -cétoglutarate formant ainsi l'AAKG). L'effet indésirable le plus courant est

l'induction de troubles digestifs notamment si la prise est réalisée à jeun. La dose optimale se situe autour de 9 grammes par jour (125,126). De par son effet vasodilatateur et donc hypotenseur, la prise d'arginine est contre-indiquée chez les personnes ayant des antécédents d'infarctus du myocarde et chez les personnes ayant des traitements antihypertenseurs et vasodilatateurs.

Les sportifs peuvent l'utiliser en association avec la caféine par exemple pour un effet « booster » ou seule avant l'entraînement pour ressentir une meilleure congestion lors d'exercice de force (figure 45).

Cependant, l'arginine subit une grande dégradation par le foie. Ainsi, il y aura une différence entre la quantité ingérée et la quantité réelle absorbée. Pour cette raison, on préfère la supplémentation de son précurseur : la citrulline. Cette dernière ne sera pas capturée par le foie et passera librement jusqu'aux reins où elle sera métabolisée en arginine.



Figure 45 : exemples de compléments d'arginine (127,128)

## E. La citrulline

### 1. Présentation

La citrulline (figure 46) est un acide aminé semi-essentiel non protéique. On dit que la citrulline est non protéique car contrairement aux autres acides aminés classiques, la nourriture n'apporte pas de citrulline, il n'y a que la pastèque qui en apporte un peu. En conséquence, toute notre citrulline doit être synthétisée à partir de la destruction intestinale de divers autres acides aminés comme la glutamine et l'arginine. En contrepartie, au niveau des reins, la citrulline est massivement convertie en arginine (129).

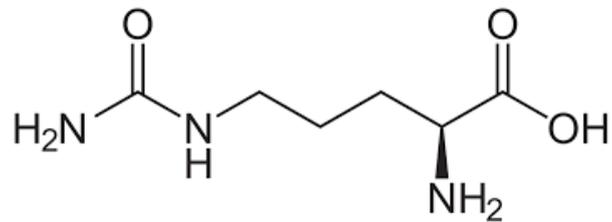


Figure 46 : la citrulline

La citrulline est commercialisée sous 2 formes : la L-Citrulline qui est la forme la plus pure et le malate de citrulline qui combine deux acides aminés (la L-Citrulline et le DL-malate). Dans cette dernière, les proportions peuvent varier suivant les fabricants.

### 2. Fonctions biologiques

La citrulline est un précurseur important de la biosynthèse de l'arginine. Contrairement à l'arginine, elle n'est pas métabolisée par l'arginase intestinale et n'est pas extraite de la circulation sanguine systémique vers le foie pour être dégradée et éliminée (130). Elle augmente donc la concentration d'arginine plasmatique et ce sont les effets de cette dernière qui seront donc mis à profit.

### 3. Exemples et utilisations

La courte durée de vie de la citrulline dans le sang suggère qu'il faille utiliser cet acide aminé au moins 2 fois par jour (1,5 gramme le matin et le soir) afin d'obtenir une élévation constante de sa concentration dans le sang et en conséquence d'augmenter la réponse anabolique à l'entraînement.

On la retrouve peu seule dans un complément alimentaire, elle est souvent associée à d'autres acides aminés comme par exemple dans le « pré-work-out » du laboratoire Eric Favre (figure 47). Celui-ci associe de la citrulline, de la  $\beta$ -alanine, de la créatine et d'autres éléments et clame de réduire ainsi la fatigue pour un meilleur entraînement.



Figure 47 : Pré-work-out du laboratoire Eric Favre (131)

## F. L'alanine

### 1. Présentation

L'alanine est un acide aminé non indispensable. L'alanine joue un rôle-clé dans le cycle « glucose-alanine » (figure 48) entre les tissus, en particulier le muscle, siège de la dépense énergétique, et le foie, siège du stockage du glucose. Elle est synthétisée dans les cellules musculaires à partir du pyruvate (provenant du glucose) par le processus de transamination et à partir des acides aminés

branchés (valine, leucine, isoleucine). Dans le foie, l'alanine est désaminée et se transforme en pyruvate. La néoglucogénèse transforme le squelette carboné restant en glucose qui est alors libéré dans la circulation sanguine afin d'être utilisé par la cellule musculaire.

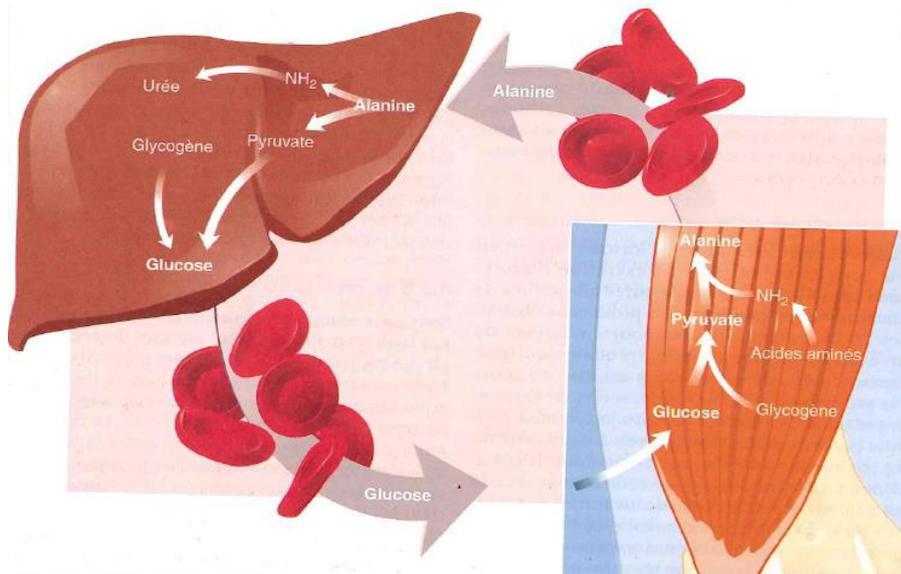


Figure 48 : le cycle glucose-alanine (8)

L'alanine n'est pas utilisée en tant que telle comme complément alimentaire, c'est la  $\beta$ -alanine qui joue ce rôle (figure 47).

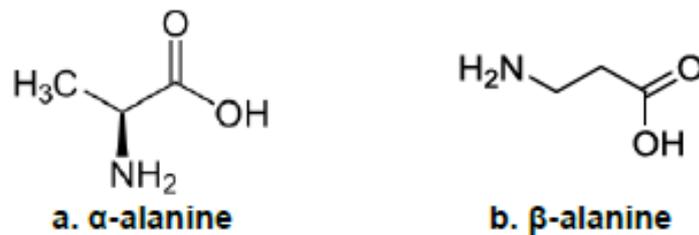


Figure 49 : structures de l' $\alpha$  et la  $\beta$  alanine

## 2. Fonctions biologiques

La  $\beta$ -alanine est utilisée par les cellules pour synthétiser différentes protéines dont la carnosine, petite molécule protéique présente à des concentrations élevées au sein des cellules nerveuses et musculaires. La carnosine est constituée de  $\beta$ -alanine et histidine. Son pouvoir tampon permet de

neutraliser les ions  $H^+$  produits en grande quantité lors des exercices intenses induisant une acidose lactique (132).

### 3. Exemples et utilisations

Certains travaux rapportent que l'ingestion de  $\beta$ -alanine à raison de 3g/j pendant 4 semaines puis de 1,5g/j permet d'augmenter la concentration intramusculaire de carnosine et d'améliorer la performance lors d'exercices de haute intensité (133). En outre, l'association  $\beta$ -alanine et de bicarbonate pourrait avoir un effet synergique sur la performance lors d'exercice d'une heure et plus (134).

La  $\beta$ -alanine peut donc être utilisée avant un entraînement seule ou dans un mélange comme on la retrouve dans le « pré-work-out » du laboratoire Eric Favre (figure 47).

Les effets secondaires peuvent être l'apparition de paresthésies (fourmillements, picotements, engourdissements).

## G. La taurine

### 1. Présentation

La taurine (figure 50) est un dérivé d'acide aminé soufré synthétisé par l'organisme à partir de la méthionine et de la cystéine. Elle est également apportée par les aliments et se retrouve principalement dans la viande, les fruits de mer, le lait et les œufs mais est absente du monde végétal. Elle est non indispensable chez l'adulte mais est très abondante dans l'organisme. On la retrouve dans le muscle strié principalement (75% du total), le cerveau, le foie, les leucocytes, les plaquettes et la rétine (34,135).

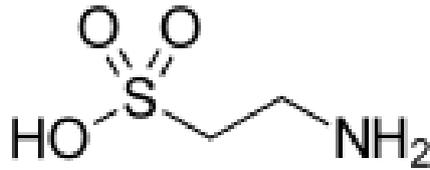


Figure 50 : structure de la taurine

Les boissons en contenant ont longtemps été interdites en France à cause de suspicions d'effets indésirables neurocomportementaux. C'est depuis 2008, avec l'autorisation de la commercialisation de Red Bull®, que l'utilisation de la taurine est finalement autorisée en France, puisqu'aucune nocivité n'a pu être prouvée.

## 2. Fonctions biologiques

La taurine n'entre pas dans la composition des protéines mais est douée de nombreuses propriétés :

- Stabilisant des membranes des cellules (en facilitant le passage membranaire du sodium et du potassium)
- Antioxydant : neutralisation des radicaux libres et des ions hypochloreux
- Détoxifiant : elle conjugue les acides biliaires en vue de leur élimination et stimule la synthèse des acides biliaires
- Osmorégulateur et contrôle des flux ioniques : maintien du volume cellulaire dans des limites physiologiques et du taux de calcium dans la cellule cardiaque
- Hypoglycémiant avec sa capacité de fixation aux récepteurs cellulaires de l'insuline
- Neuromodulateur : il s'agit d'un neuro-inhibiteur du type du GABA
- Développement tissulaire : rôle dans le maintien de l'intégrité structurale et fonctionnelle des cônes photorécepteurs de la rétine

### 3. Exemples et utilisations

La taurine est aujourd'hui retrouvée dans de nombreux compléments alimentaires et, pour les sportifs, elle entre dans la composition de boissons énergisantes qui permettraient, selon les laboratoires, d'améliorer les performances athlétiques (136). Cependant, il faudra être prudent puisque ces boissons contiennent souvent trop de caféine et de sucre et sont hypoglycémiantes. La dose de taurine peut être de 2 à 3 grammes par jour.

La taurine a aussi des avantages dans la récupération par sa modulation des canaux ioniques, de l'excitabilité de la membrane musculaire et de la protection des cellules du stress oxydatif (137,138).

## H. La glycine

### 1. Présentation

La glycine (figure 51) est le seul acide aminé sans carbone asymétrique. Il s'agit d'un acide aminé non essentiel qui peut pourtant faire défaut chez les sportifs. Elle est synthétisée à partir de la sérine, de la thréonine, de la choline et de l'hydroxyproline via le métabolisme inter-organes impliquant principalement le foie et les reins (139).

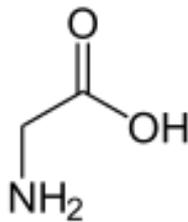


Figure 51 : structure de la glycine

Du fait de l'omniprésence de cet acide aminé dans le collagène des muscles, des tendons, des ligaments et de la peau, une activité physique intense va accroître les besoins en glycine.

## 2. Fonctions biologiques

La glycine est utilisée pour la biosynthèse du glutathion, de l'hème, de la créatine, des acides nucléiques et de l'acide urique. En outre, la glycine est un composant important des acides biliaires sécrétés dans la lumière de l'intestin grêle qui est nécessaire à la digestion des graisses alimentaires et à l'absorption des acides gras à longue chaîne.

La glycine a un rôle important dans la régulation métabolique, les réactions antioxydantes et la fonction neurologique. Ainsi, ce nutriment a été utilisé pour : prévenir les lésions tissulaires, améliorer la capacité antioxydante, favoriser la synthèse des protéines et la cicatrisation des plaies, améliorer l'immunité et traiter les troubles métaboliques de l'obésité, du diabète, des maladies cardiovasculaires, des lésions d'ischémie-reperfusion, des cancers et de diverses maladies inflammatoires.

## 3. Exemples et utilisations

La glycine est utilisée principalement pour la récupération nerveuse, musculaire et tendineuse des sportifs (figure 52) (par exemple 3 grammes de glycine avant le coucher raccourcirait la durée d'endormissement (140,141)).



Figure 52 : exemple de compléments de glycine (142)

## I. La carnitine

### 1. Présentation

La L-carnitine (figure 52) est synthétisée par l'organisme à partir de deux AA essentiels que sont la méthionine et la lysine. La L-carnitine est la forme physiologique et active de la carnitine. Chez l'Homme, le foie et le cœur sont les principaux sites de synthèse. Cependant, environ la moitié de la quantité de L-carnitine entrant dans le pool de l'organisme provient des apports alimentaires (viandes rouges principalement). L'apport moyen se situe entre 50 mg et 1g par 24h, ce qui équilibre les pertes urinaires estimées aux alentours de 50mg/j. Chez l'Homme, 98% de la L-carnitine présente dans l'organisme est retrouvée dans le muscle squelettique ou le myocarde.

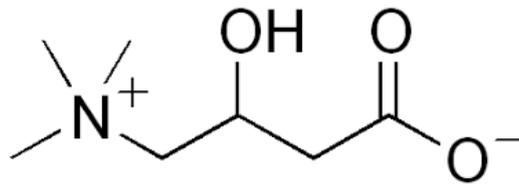


Figure 53 : structure de la L-carnitine

### 2. Fonctions biologiques

La carnitine joue un rôle important dans le métabolisme des acides gras. Elle permet le transport des acides gras à chaîne longue au travers des membranes mitochondriales et donc la production d'énergie par  $\beta$ -oxydation. L'intérêt d'une supplémentation en carnitine vise à accélérer ce processus et donc en théorie augmenter la proportion d'acides gras utilisés par l'organisme (et limiter l'utilisation des réserves de glycogène dont l'épuisement est à l'origine d'une baisse des performances en aérobie notamment).

Elle module aussi le métabolisme du coenzyme-A en maintenant constant le rapport acétyl-CoA/CoA ce qui augmente le métabolisme énergétique du muscle squelettique en réduisant l'inhibition de la pyruvate déshydrogénase. Cette fonction pourrait réduire l'accumulation d'acide lactique et augmenter ainsi la performance sportive.

La L-carnitine jouerait le rôle de vasodilatateur au niveau des tissus périphériques et augmenterait ainsi la circulation sanguine régionale et l'approvisionnement en oxygène. L'apport de nutriments pendant l'effort est donc augmenté et la récupération après l'effort est améliorée (143–145).

### 3. Exemples et utilisations

Le marché de la L-carnitine prend pour cible les sportifs d'endurance qui pensent que ce stimulateur métabolique augmente la combustion des graisses et épargne le glycogène ; et également les culturistes dans la mesure où ce composé diminuerait la masse grasse (figure 54). D'après différentes études, la carnitine aurait plus d'effet chez les personnes en surpoids ou ayant une masse grasse importante (17 à 20%).

L'EFSA propose une dose de 2000mg/j de L-carnitine.



Figure 54 : exemple de compléments de L-Carnitine (146)

## IV. La créatine

### A. Présentation

La créatine est un dérivé d'acide aminé. Elle peut être soit synthétisée dans l'organisme, soit apportée par l'alimentation (viande, poisson). Sa synthèse endogène est possible par le foie, le pancréas et les reins à partir d'acides aminés comme la glycine, l'arginine ou la méthionine. Elle est stockée dans les muscles squelettiques principalement (mais également au niveau du cerveau) et transportée et distribuée dans l'organisme par le sang. L'apport par l'alimentation est essentiellement assuré par la viande, le poisson et les produits animaux.

Dans le muscle squelettique, elle est retrouvée sous deux formes : une forme phosphorylée appelée la phosphocréatine (PCr) et une forme libre (Cr) (figure 55).

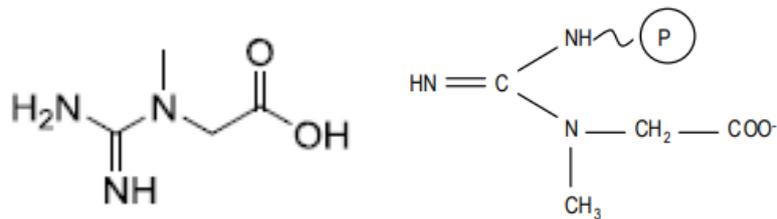


Figure 55 : structures de la créatine et la créatine phosphate

### B. Métabolisme

Après absorption intestinale, la créatine est essentiellement captée par le muscle squelettique où elle sera transformée en PCr favorisant ainsi sa rétention dans le muscle. Elle sera par la suite transformée de façon réversible en Cr, puis en créatinine de façon irréversible, toujours au niveau du muscle même. La créatinine est excrétée dans l'urine, parfois également au niveau sudoral ; cette excrétion urinaire (environ 2g/j) est augmentée lors de l'exercice physique. Lors d'exercices répétés et intenses, la PCr est transformée en Cr qui va rapidement redonner de la PCr, il y a donc une utilisation des mêmes molécules et ceci de nombreuses fois.

## C. Rôles de la créatine dans l'organisme

Comme vu précédemment, l'ATP doit être resynthétisée à partir d'ADP par l'intermédiaire de la PCr. La PCr sert donc avant tout de filière énergétique et correspond à la voie anaérobie alactique, elle a une disponibilité presque immédiate même si les réserves sont limitées : ainsi la voie de la PCr est très utile pour les exercices de très forte intensité et de courte durée, ou bien pour les changements rapides de puissance comme l'haltérophilie, la natation courte distance, et le sprint.

D'autres fonctions ont été attribuées à la créatine comme un rôle tampon de l'équilibre acide base, ou le rôle de molécule signal augmentant la pression osmotique et la synthèse protéique.

La créatine stimule l'activité des cellules satellites impliquées dans le développement de la masse musculaire.

## D. Les différentes créatines retrouvées sur le marché

Différentes variétés de créatines sont retrouvées sur le marché (147).

- La créatine monohydrate composée d'une molécule de créatine associée à une molécule d'eau. C'est la forme la plus retrouvée et celle qui a été évaluée scientifiquement. Elle contient 88% et 12% d'eau donc si une étiquette précise 5 grammes de créatine, la consommation pure sera de 4,4 grammes.
- La créatine citrate et la créatine malate associent une molécule de créatine avec une molécule d'acide citrique ou acide malique (deux intermédiaires du cycle de Krebs producteurs d'énergie pour l'organisme)
- La créatine phosphate est la forme directement transformée de la créatine monohydrate
- La créatine magnésium qui associe la créatine et le magnésium qui permettrait d'améliorer son absorption
- La créatine micronisée, la créatine effervescente et la créatine citrate qui améliorent la solubilité et donc l'absorption de la créatine

- L'ester de créatine qui améliorerait la biodisponibilité

## E. Utilisations

La créatine est ainsi devenue une substance ergogénique représentant une part importante des compléments alimentaires utilisés dans les sports de force (148).

- Force musculaire

La créatine stimule la force musculaire par différents mécanismes. Elle augmente tout d'abord les stocks de phosphocréatine, molécule qui régénère l'ATP. Elle diminue la vitesse de destruction de l'ATP et augmente sa vitesse de synthèse : elle permet ainsi au muscle d'économiser au mieux sa meilleure réserve d'énergie qu'est l'ATP. Elle favorise aussi la disparition d'ADP qui est un vecteur de fatigue.

- Performances physiques (149)

D'autres études semblent montrer un effet bénéfique de la prise de créatine sur l'amélioration des performances lors d'exercices musculaire locaux et répétés, de type explosif sur de très courtes durées. La force maximale développée au cours d'un mouvement unique semble être améliorée par la prise de créatine (20 g/j pendant 5 jours). Il semble que cet effet soit en partie lié à la plus grande disponibilité en créatine dans le muscle. Cet effet positif est plus marqué chez des sujets sédentaires ou peu entraînés ayant à l'origine un taux de PCr musculaire plus bas (29).

- Composition corporelle

De très nombreuses études ont permis de montrer que les sujets recevant un complément à base de créatine présentaient une augmentation de leur poids corporel. Des augmentations du poids corporel variant de 1 à 2 kg ont été observées, le plus souvent attribuées à une rétention d'eau sous-cutanée. Cette augmentation très modérée du poids corporel correspond à de faibles variations de la masse musculaire

En théorie, la créatine ne devrait pas être utilisée avant ou pendant un effort puisqu'elle a une action légèrement hypoglycémiante. Cependant, on la retrouve régulièrement dans les boissons « pré-work-out » (figure 47).

Il n'y a pas d'ANC en créatine puisqu'elle peut être synthétisée par l'organisme et peut répondre aux besoins de l'organisme selon des mécanismes ajustables. La prise quotidienne de moins de 3 g de créatine par jour est considérée comme non pourvoyeuse d'effets indésirables par l'EFSA.

Dans les compléments, la créatine est retrouvée sous forme de poudre, gel, sirop et soit seule, soit associée à des glucides ou protéines et acides aminés (figure 56).



Figure 56 : exemple de compléments de créatine (150)

Les effets indésirables rapportés peuvent être l'apparition de crampes musculaires qui sont plus importantes en cas de déshydratation, et également des troubles digestifs.

## LES CONSEILS A L'OFFICINE

## I. Estimer les besoins

### A. Le métabolisme de base et les dépenses énergétiques

Le métabolisme de base (MB) est la quantité d'énergie dont l'organisme a besoin pour remplir ses fonctions vitales (contraction du cœur, respiration, régulation thermique...). Ce métabolisme varie selon les personnes : sexe, poids, âge, moment de la journée. Plusieurs formules existent pour estimer le métabolisme de base. Pour calculer ensuite la dépense énergétique journalière, les valeurs obtenues de MB doivent être multipliées par un facteur PAL (« Physical Activity Level ») ou NAP (Niveau d'Activité Physique) qui prend en compte les différentes activités physiques en leur donnant un coefficient plus ou moins élevé selon l'intensité de l'activité. Les valeurs de PAL pour un adulte sont les suivantes :

- 1,2 : mode de vie uniquement assis ou couché (personnes âgées, handicapées)
- 1,4 : travail assis avec peu ou pas de loisirs fatigants (30 minutes de marche par jour)
- 1,6 : travail assis, activités debout ou marche occasionnelle (1 heure de sport par jour)
- 1,8 : travail debout ou marche (1h30 à 2h de sport par jour)
- 2 : travail physiquement intense (3 à 4h de sport par jour)

On obtient ainsi la quantité d'énergie qu'une personne a besoin de consommer chaque jour et les calories doivent se répartir ainsi : 15% sous forme de protéines, 30% sous forme de lipides et 55% sous forme de glucides.

Il existe des calculs plus simples, pour connaître les apports énergétiques moyens, qui peuvent être applicables à l'officine :

- Pour un homme adulte
  - Non sportif : 35 à 40 kcal/kg/j
  - Sportif : 45 à 50 kcal/kg/j

- Pour une femme adulte
  - Non sportive : 30 à 35 kcal/kg/j
  - Sportive : 40 à 45 kcal/kg/j

Ainsi, si la personne nous donne son poids, il est possible de calculer rapidement ses besoins et la répartition des macronutriments.

Pour connaître uniquement la répartition des protéines pour un sportif, on peut également utiliser les valeurs suivantes :

- Si l'objectif est de maintenir son poids en continuant l'activité et l'entraînement, l'apport énergétique devra alors être équilibré par rapport aux dépenses : soit un apport de 1,2 à 1,6g de protéines/kg/j.
- Si l'objectif est de prendre du poids, prendre du muscle et développer sa masse musculaire, l'apport énergétique devra alors être plus important quantitativement que les dépenses (sans être en excédent trop important et stocker sous forme de gras) : soit un apport de 1,6 à 2g de protéines/kg/j.
- Si l'objectif est de perdre de la graisse, alors l'apport énergétique devra être inférieur aux dépenses. Cependant, il faudra conserver la masse maigre et éliminer la masse grasse, les apports en protéine devront donc être suffisant contrairement à ceux en glucides et lipides qui seront diminués : soit un apport de 1,5 à 2g de protéines/kg/j .

## II. Intégrer les compléments alimentaires aux objectifs du sportifs

Chaque discipline sportive mobilise des filières énergétiques et des aptitudes différentes. Les efforts orientés vers l'endurance, la puissance ou l'explosivité peuvent ainsi nécessiter des compléments adaptés.

### A. Le sportif d'endurance

Bien que l'objectif des athlètes d'endurance ne soit pas nécessairement de maximiser la volume et la force musculaire, la perte de tissu maigre peut avoir un effet néfaste significatif sur les performances d'endurance. Par conséquent, ces athlètes doivent maintenir leur masse musculaire pour assurer une performance adéquate.

Ainsi, pour ces sportifs, les conseils peuvent être les suivants :

- Avant l'effort : il existe des boissons énergisantes ou des mélanges de sucre, d'acides aminés et dérivés mais il faudra être prudent car ils peuvent contenir des substances hypoglycémiantes ou des glucides en excès entraînant des hypoglycémies réactionnelles et donc une contre-performance.
- Pendant l'effort : il est intéressant de consommer une boisson contenant des glucides et des acides aminés. Les boissons énergétiques n'ont pas toujours d'acides aminés donc il est possible d'en rajouter. Cela permettra alors de retarder l'apparition de la fatigue générale.
- Après l'effort : la supplémentation est surtout basée sur les glucides afin de refaire un stock de glycogène mais il faut également ajouter des protéines qui vont permettre d'accélérer la synthèse du glycogène musculaire et favoriser la récupération des tissus musculaires et leurs lésions. On peut également ajouter la glutamine qui favorisera la récupération
- En dehors des entraînements, d'autres compléments peuvent être consommés :

- La carnitine peut être consommée sur des périodes de quelques mois (3 à 6 mois) pour les personnes souhaitant perdre de la graisse.
- L'arginine peut être utilisée avant et après un entraînement pour son effet antifatigue (accélération de l'évacuation des déchets métaboliques comme le lactate et l'ammoniaque).

## B. Le sportif de force

La pratique régulière d'exercices explosifs (haltérophilie, arts martiaux, sport de combat) conduit à une augmentation visible de la masse musculaire qui s'hypertrophie. Une fois l'effort de force terminé, il y a une accélération du renouvellement des protéines. Ce phénomène explique le besoin d'une consommation plus importante de protéines. La prise orale d'acides aminés augmente leur disponibilité locale et optimise l'augmentation de l'anabolisme protéique lié à la pratique de l'exercice de force.

La justification théorique de l'enrichissement de la ration alimentaire en protéines tient principalement en deux points : pallier d'éventuels déficits induits par l'utilisation d'acides aminés pendant les contractions musculaires et/ou augmenter les processus de construction protéique.

Ainsi, pour ces sportifs, les conseils peuvent être les suivants :

Avant l'entraînement et selon le moment de la journée, il est possible de consommer des protéines. Ensuite, différents acides aminés et dérivés peuvent être utilisés dans les « pré-workout » (terme anglais signifiant « avant l'entraînement »). On retrouve par exemple l'arginine, la citrulline, la  $\beta$ -alanine qui auront pour fonctions de donner un effet plus congestionné aux muscles pendant l'effort et de stimuler l'organisme, soit en utilisant des mélanges déjà fait qui sont disponibles sur le marché (mais comme indiqué précédemment, il faudra être prudent avec les substances hypoglycémiantes, comme la créatine par exemple), soit en créant soi-même son mélange.

Pendant la séance, les sportifs peuvent consommer une boisson à base de BCAA afin de garder un niveau constant en acides aminés.

Après la séance, les protéines sont primordiales afin d'aider à maintenir la masse musculaire et assurer la resynthèse des protéines musculaires au niveau des tissus lésés pendant l'effort. Les hormones et enzymes vont réparer les dommages causés par l'exercice et reconstituent les stocks de glycogène. Le choix du type de protéine va dépendre des objectifs : soit une whey « classique », soit un whey isolat si le sportif souhaite un maintien de la masse musculaire avec perte de masse grasse.

Pour la récupération et tout au long de la journée, les différents acides aminés peuvent être consommés comme les BCAA, la glutamine, la taurine. La créatine et la carnitine peuvent être consommées en période de 3 à 6 mois. Concernant les gainers, ils peuvent éventuellement être consommés en collation.

Au coucher, la prise de caséine peut être intéressante puisqu'elle est digérée à un rythme beaucoup plus lent et permet une libération d'acides aminés pendant plusieurs heures durant la nuit.

## C. Les conseils associés

Il ne s'agit pas seulement de ce que le sportif ingère, mais aussi de quand il l'ingère. Bien que le corps humain digère les protéines à chaque fois qu'on en consomme, il existe certaines périodes où l'organisme est plus réceptif (après l'entraînement par exemple).

Différents conseils peuvent être donnés au comptoir :

- Prendre ses repas à heures régulières et ne pas sauter de repas
  - Fractionner les repas en 5 prises de 20 à 30g de protéines (alimentation ou compléments alimentaires)

- Avoir une alimentation variée et équilibrée pour couvrir les besoins en micronutriments et macronutriments et adapter les apports selon le sport pratiqué, sa durée et son intensité
  - La prise en charge de la nutrition est un sujet dépendant de l'achat d'un complément alimentaire.
  - Les micronutriments à la différence des macronutriments ne fournissent pas d'énergie (calories) mais assurent à notre organisme un fonctionnement optimal.
  - Notre système digestif, via des mécanismes enzymatiques spécifiques, permet également d'obtenir des micronutriments, tels que par exemple les acides aminés constituant les protéines.
  
- Les piliers : alimentation, entraînement, hydratation, récupération
  - Le maintien de l'équilibre de la balance énergétique, une alimentation riche et diversifiée en vitamines et minéraux, une hydratation suffisante, ainsi qu'une bonne récupération sont primordiaux pour optimiser la performance sportive.

# CONCLUSION

La contribution des protéines au niveau de l'exercice musculaire se situe à trois niveaux : le renouvellement de la masse musculaire, la réparation des microlésions induites par l'effort, ainsi que l'apport énergétique en dernier recours. La supplémentation en protéine représente actuellement l'aide ergogénique la plus couramment utilisée dans le milieu sportif, avec une certaine « tradition » pour les athlètes de force qui souhaitent développer leur masse musculaire. De plus, comme nous l'avons vu, les acides aminés ont de nombreuses fonctions indispensables à l'organisme et impliquées dans l'optimisation de la performance sportive.

La prise de compléments protéinés ne remplace pas l'entraînement et elle doit être considérée comme un moyen permettant de maintenir un certain équilibre physiologique du corps en cas de forte sollicitation de l'organisme. Ce n'est donc pas une solution miracle pour améliorer les performances sportives en soi et elle doit toujours être pensée en fonction de l'intensité de l'activité pratiquée.

Il n'est pas évident pour le pharmacien d'officine de choisir une gamme de produits de nutrition sportive. Les références sont souvent nombreuses : chaque gamme comprend en moyenne entre quarante et soixante-dix produits. Les attentes des sportifs sont également très diverses et le conseil d'un produit doit être adapté à chacun d'entre eux. Le pharmacien doit être capable d'expliquer et de conseiller les compléments mis à disposition dans son officine. Il sera important, pour chaque demande, d'identifier la situation. Il faudra aborder les raisons de ses achats, pour quel sport est-ce destiné, quels sont les objectifs? Le pharmacien doit également promouvoir l'équilibre alimentaire et aider la personne à adapter son alimentation et ses prises de compléments selon son effort et son rythme de vie.

# BIBLIOGRAPHIE

1. AFSSA. Etude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA2). 2009.
2. ANSES. Etude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3). 2017 p. 566.
3. Masson O. Biochimie: bases biochimiques de la diététique. Paris: Editions Tec & Doc; 2008.
4. Poortmans JR, Boisseau N. Biochimie des activités physiques et sportives. 2017.
5. Reeds PJ. Dispensable and Indispensable Amino Acids for Humans. *The Journal of Nutrition*. 1 juill 2000;130(7):1835S-1840S.
6. Cano N, Barnoud D, Schneider S, Vasson M-P, Hasselmann M, Leverve X. *Traité de nutrition artificielle de l'adulte* [Internet]. Paris: Springer; 2007 [cité 12 févr 2020]. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/978-2-287-33475-7>
7. SIMON M. Structures des protéines [Internet]. *Cours Pharmacie*. 2011 [cité 12 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.cours-pharmacie.com/biochimie/structures-des-proteines.html>
8. Mcardle W. *Nutrition & performances sportives*. Bruxelles: De Boeck; 2004.
9. AFSSA. Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations (synthèse). 2007 p. 68.
10. AFSSA. Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations. 2007 p. 461.
11. Collège des enseignants de nutrition. *Métabolisme protéique*. 2010. :30.
12. Widmaier EP, Raff H, Strang KT, Widmaier EP, Vander AJ. *Physiologie humaine: les mécanismes du fonctionnement de l'organisme* : Vander. 2013.

13. Collège des enseignants de nutrition. Nutrition: enseignement intégré, UE nutrition. Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine): Elsevier Masson; 2014.
14. L'institut français de nutrition. Les protéines [Internet]. 1997. Disponible sur: <https://alimentation-sante.org/wp-content/uploads/2011/07/dossier-scient-9.pdf>
15. Monod H. Physiologie du sport: bases physiologiques des activités physiques et sportives [Internet]. 2011 [cité 12 févr 2020]. Disponible sur: [https://nls.ldls.org.uk/welcome.html?ark:/81055/vdc\\_100052772979.0x000001](https://nls.ldls.org.uk/welcome.html?ark:/81055/vdc_100052772979.0x000001)
16. Wilmore JH, Costill DL, Kenney WL. Physiologie du sport et de l'exercice. 2017.
17. Fryburg DA, Gelfand RA, Barrett EJ. Growth hormone acutely stimulates forearm muscle protein synthesis in normal humans. *Am J Physiol.* mars 1991;260(3 Pt 1):E499-504.
18. Tipton KD, Ferrando AA, Phillips SM, Doyle D, Wolfe RR. Postexercise net protein synthesis in human muscle from orally administered amino acids. *Am J Physiol.* 1999;276(4):E628-634.
19. Levenhagen DK, Gresham JD, Carlson MG, Maron DJ, Borel MJ, Flakoll PJ. Postexercise nutrient intake timing in humans is critical to recovery of leg glucose and protein homeostasis. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* juin 2001;280(6):E982-993.
20. Børsheim E, Cree MG, Tipton KD, Elliott TA, Aarsland A, Wolfe RR. Effect of carbohydrate intake on net muscle protein synthesis during recovery from resistance exercise. *J Appl Physiol.* févr 2004;96(2):674-8.
21. ANSES. Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. 2016 p. 329.

22. Trumbo P, Schlicker S, Yates AA, Poos M, Food and Nutrition Board of the Institute of Medicine, The National Academies. Dietary reference intakes for energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acids, cholesterol, protein and amino acids. *J Am Diet Assoc.* nov 2002;102(11):1621-30.
23. Joint FAO/WHO/UNU Expert Consultation on Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition (2002 : Geneva S, Nations F and AO of the U, Organization WH, University UN. Protein and amino acid requirements in human nutrition : report of a joint FAO/WHO/UNU expert consultation [Internet]. World Health Organization; 2007 [cité 20 févr 2020]. Disponible sur: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/43411>
24. Volatier J-L. Enquête individuelle et nationale sur les consommations alimentaires. Paris: Tec & Doc; 2000.
25. Levenhagen DK, Carr C, Carlson MG, Maron DJ, Borel MJ, Flakoll PJ. Postexercise protein intake enhances whole-body and leg protein accretion in humans. *Med Sci Sports Exerc.* mai 2002;34(5):828-37.
26. Lemon PW, Dolny DG, Yarasheski KE. Moderate physical activity can increase dietary protein needs. *Can J Appl Physiol.* oct 1997;22(5):494-503.
27. Phillips SM, Van Loon LJC. Dietary protein for athletes: from requirements to optimum adaptation. *J Sports Sci.* 2011;29 Suppl 1:S29-38.
28. Jäger R, Kerksick CM, Campbell BI, Cribb PJ, Wells SD, Skwiat TM, et al. International Society of Sports Nutrition Position Stand: protein and exercise. *J Int Soc Sports Nutr.* 2017;14:20.
29. Bigard X, Guézennec C-Y. Nutrition du sportif. 2017.
30. Tarnopolsky MA, Atkinson SA, MacDougall JD, Chesley A, Phillips S, Schwarcz HP. Evaluation of protein requirements for trained strength athletes. *J Appl Physiol.* nov 1992;73(5):1986-95.

31. Lemon PW. Do athletes need more dietary protein and amino acids? *Int J Sport Nutr.* juin 1995;5 Suppl:S39-61.
32. Lemon PW. Effects of exercise on dietary protein requirements. *Int J Sport Nutr.* déc 1998;8(4):426-47.
33. Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments [Internet]. [cité 18 févr 2020]. Disponible sur: <https://ciqual.anses.fr/>
34. Vasson M-P. Compléments alimentaires: les clés pour les conseiller à l'officine. Paris-La Défense: Les Éditions "Le Moniteur des pharmacies; 2015.
35. Hoffman JR, Falvo MJ. Protein – Which is Best? *J Sports Sci Med.* 1 sept 2004;3(3):118-30.
36. Sarwar G. The protein digestibility-corrected amino acid score method overestimates quality of proteins containing antinutritional factors and of poorly digestible proteins supplemented with limiting amino acids in rats. *J Nutr.* mai 1997;127(5):758-64.
37. L'équilibre alimentaire Celnat [Internet]. Celnat. 2017 [cité 20 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.celnat.fr/equilibre-alimentaire>
38. Fenton TR, Lyon AW, Eliasziw M, Tough SC, Hanley DA. Meta-analysis of the effect of the acid-ash hypothesis of osteoporosis on calcium balance. *J Bone Miner Res.* nov 2009;24(11):1835-40.
39. Kerstetter JE, O'Brien KO, Insogna KL. Dietary protein, calcium metabolism, and skeletal homeostasis revisited. *Am J Clin Nutr.* 2003;78(3 Suppl):584S-592S.
40. Dawson-Hughes B, Harris SS, Rasmussen H, Song L, Dallal GE. Effect of dietary protein supplements on calcium excretion in healthy older men and women. *J Clin Endocrinol Metab.* mars 2004;89(3):1169-73.

41. Mullins NM, Sinning WE. Effects of resistance training and protein supplementation on bone turnover in young adult women. *Nutr Metab (Lond)*. 17 août 2005;2:19.
42. Poortmans JR, Dellalieux O. Do regular high protein diets have potential health risks on kidney function in athletes? *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. mars 2000;10(1):28-38.
43. Martin WF, Armstrong LE, Rodriguez NR. Dietary protein intake and renal function. *Nutr Metab (Lond)*. 20 sept 2005;2:25.
44. Antonio J, Ellerbroek A, Silver T, Vargas L, Peacock C. The effects of a high protein diet on indices of health and body composition--a crossover trial in resistance-trained men. *J Int Soc Sports Nutr*. 2016;13:3.
45. La contraction musculaire [Internet]. Planet-Vie. [cité 1 mars 2020]. Disponible sur: <https://planet-vie.ens.fr/thematiques/animaux/systeme-locomoteur/la-contraction-musculaire>
46. Guezennec Charles-Yannick. Physiologie de l'activité musculaire lors de la pratique sportive [Internet]. Disponible sur: <https://essonne.franceolympique.com/essonne/fichiers/File/physiologieeffort.pdf>
47. Bertrand Baron, Patrick Pelayo. La physiologie de l'exercice [Internet]. 2011. Disponible sur: <http://campusport.univ-lille2.fr/physio/res/resspdf.pdf>
48. Journal officiel des Communautés européennes. Directive 2002/46/CE du Parlement Européen et du Conseil du 10 juin 2002 relative au rapprochement des législations des Etats membres concernant les compléments alimentaires. 2002.
49. Décret n°2006-352 du 20 mars 2006 relatif aux compléments alimentaires. 2006-352 mars 20, 2006.
50. Allégations nutritionnelles et de santé [Internet]. European Food Safety Authority. [cité 1 mars 2020]. Disponible sur: <http://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/nutrition>

51. Allégations nutritionnelles et de santé - Commission européenne [Internet]. [cité 1 mars 2020]. Disponible sur: [https://ec.europa.eu/food/safety/labelling\\_nutrition/claims/register/public/?event=search](https://ec.europa.eu/food/safety/labelling_nutrition/claims/register/public/?event=search)
52. AFLD - Agence française de lutte contre le dopage [Internet]. AFLD. [cité 27 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.afld.fr/>
53. Compléments alimentaires et dopage : quelle sécurisation ? [Internet]. SFNS. 2020 [cité 27 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.nutritiondusport.fr/securisation-complements-alimentaires-sportifs/>
54. Prévention du dopage et alimentation - Une norme AFNOR pour apporter de la confiance aux sportifs [Internet]. AFNOR Normalisation. 2012 [cité 27 févr 2020]. Disponible sur: <https://normalisation.afnor.org/actualites/prevention-du-dopage-et-alimentation-une-norme-afnor-pour-apporter-de-la-confiance-aux-sportifs/>
55. SPORT Protect – label antidopage – norme Afnor V94001 – Organisme antidopage [Internet]. [cité 27 févr 2020]. Disponible sur: <http://www.sport-protect.org/organisme-antidopage/>
56. Certification ISO 22000 - AFNOR Certification [Internet]. [cité 27 févr 2020]. Disponible sur: <https://certification.afnor.org/qualite-audit/certification-iso-22000-systemes-management-securite-denrees-alimentaires>
57. ISO - ISO 22000 Management de la sécurité des denrées alimentaires [Internet]. ISO. [cité 27 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/iso-22000-food-safety-management.html>
58. ISO - Nom et logo de l'ISO [Internet]. ISO. [cité 27 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/iso-name-and-logo.html>

59. La nutrivigilance, qu'est-ce que c'est ? | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 27 févr 2020]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/la-nutrivigilance-quest-ce-que-cest>
60. Liste des interdictions [Internet]. Agence mondiale antidopage. 2017 [cité 3 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.wada-ama.org/fr/content/liste-des-interdictions>
61. Cespharm - Campagne « Compléments alimentaires & dopage » [Internet]. [cité 3 mars 2020]. Disponible sur: <http://www.cespharm.fr/fr/Prevention-sante/Cespharm/Activites/Conception-et-realisation-d-actions-de-sante-publique/Campagne-Complements-alimentaires-dopage>
62. Vuilleumard JC, Gauthier S, Paquin P. Les ingrédients à base de protéines laitières : obtention, propriétés et utilisations [Internet]. 1989. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00929172/document>
63. Sindayikengera S, Xia W. Nutritional evaluation of caseins and whey proteins and their hydrolysates from Protamex. *J Zhejiang Univ Sci B*. févr 2006;7(2):90-8.
64. Cermak NM, Res PT, de Groot LCPGM, Saris WHM, van Loon LJC. Protein supplementation augments the adaptive response of skeletal muscle to resistance-type exercise training: a meta-analysis. *Am J Clin Nutr*. déc 2012;96(6):1454-64.
65. Witard OC, Jackman SR, Breen L, Smith K, Selby A, Tipton KD. Myofibrillar muscle protein synthesis rates subsequent to a meal in response to increasing doses of whey protein at rest and after resistance exercise. *Am J Clin Nutr*. janv 2014;99(1):86-95.
66. Eric Favre : Protéines, Nutrition Sportive, Santé & Beauté [Internet]. [cité 5 mars 2020]. Disponible sur: [https://www.ericfavre.com/fr\\_fr/](https://www.ericfavre.com/fr_fr/)

67. EAFIT Nutrition sportive de qualité marque française [Internet]. EAFIT. [cité 5 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com>
68. Dangin M, Guillet C, Garcia-Rodenas C, Gachon P, Bouteloup-Demange C, Reiffers-Magnani K, et al. The rate of protein digestion affects protein gain differently during aging in humans. *J Physiol*. 1 juin 2003;549(Pt 2):635-44.
69. Boirie Y, Dangin M, Gachon P, Vasson MP, Maubois JL, Beaufrère B. Slow and fast dietary proteins differently modulate postprandial protein accretion. *Proc Natl Acad Sci USA*. 23 déc 1997;94(26):14930-5.
70. Venesson J. Nutrition de la force [prise de muscle, perte de poids, gain de force [Internet]. Vergèze: T. Souccar; 2011 [cité 20 févr 2020]. Disponible sur: <http://banq.pretnumerique.ca/accueil/isbn/9782365490368>
71. Casein + Chocolat - 29,90 € [Internet]. Marque. [cité 5 mars 2020]. Disponible sur: [https://www.ericfavre.com/fr\\_fr/proteines/casein-p-201.htm?coul\\_att\\_detailID1](https://www.ericfavre.com/fr_fr/proteines/casein-p-201.htm?coul_att_detailID1)
72. MICELLAR CASEIN : PRENEZ DU MUSCLE SEC, « SECHEZ » [Internet]. [cité 5 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.stc-nutrition.fr/fr/1257-micellar-casein.html>
73. Soop M, Nehra V, Henderson GC, Boirie Y, Ford GC, Nair KS. Coingestion of whey protein and casein in a mixed meal: demonstration of a more sustained anabolic effect of casein. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 1 juill 2012;303(1):E152-162.
74. 100 % Blanc d'œuf liquide - Albumine 500 g - Alimentation Diététique [Internet]. PROZIS. [cité 3 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.prozis.com/fr/fr/prozis/100-blanc-duf-liquide-albumine-500-g>
75. Phillips SM, Hartman JW, Wilkinson SB. Dietary protein to support anabolism with resistance exercise in young men. *J Am Coll Nutr*. avr 2005;24(2):134S-139S.

76. Brown EC, DiSilvestro RA, Babaknia A, Devor ST. Soy versus whey protein bars: effects on exercise training impact on lean body mass and antioxidant status. *Nutr J.* 8 déc 2004;3:22.
77. Isolat de protéine de soja [Internet]. Myprotein France. [cité 1 mars 2020]. Disponible sur: <https://fr.myprotein.com/nutrition-sportive/isolat-de-proteine-de-soja/10529701.html>
78. EAFFIT Protisoya [Internet]. [cité 1 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/eafit-protisoya.html>
79. EAFFIT PROTIVEGAN [Internet]. [cité 5 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/eafit-protivegan.html>
80. Protéines Vegan, Protéine végétale tri-sources - 29,90 € [Internet]. Marque. [cité 5 mars 2020]. Disponible sur: [https://www.ericfavre.com/fr\\_fr/proteines/proteines-vegan-proteine-vegetale-tri-sources-p-224.htm?coul\\_att\\_detailID20](https://www.ericfavre.com/fr_fr/proteines/proteines-vegan-proteine-vegetale-tri-sources-p-224.htm?coul_att_detailID20)
81. Delavier F, Gundill M. Guide des compléments alimentaires pour sportifs. Paris: Vigot; 2012.
82. EAFFIT Gainer Max [Internet]. [cité 3 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/gainer-max.html>
83. EAFFIT Whey Gainer [Internet]. [cité 3 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/lean-gainer.html>
84. Mero A. Leucine supplementation and intensive training. *Sports Med.* juin 1999;27(6):347-58.
85. Kimball SR, Jefferson LS. Regulation of global and specific mRNA translation by oral administration of branched-chain amino acids. *Biochem Biophys Res Commun.* 9 janv 2004;313(2):423-7.

86. Moberg M, Apró W, Ekblom B, van Hall G, Holmberg H-C, Blomstrand E. Activation of mTORC1 by leucine is potentiated by branched-chain amino acids and even more so by essential amino acids following resistance exercise. *Am J Physiol, Cell Physiol.* 1 juin 2016;310(11):C874-884.
87. Boisseau N. Nutrition et bioénergétique du sportif: bases fondamentales. Issy-les-Moulineaux: Masson; 2005.
88. Newsholme EA, Blomstrand E. Branched-chain amino acids and central fatigue. *J Nutr.* 2006;136(1 Suppl):274S-6S.
89. Blomstrand E. Amino acids and central fatigue. *Amino Acids.* 2001;20(1):25-34.
90. Gran P, Cameron-Smith D. The actions of exogenous leucine on mTOR signalling and amino acid transporters in human myotubes. *BMC Physiol.* 25 juin 2011;11:10.
91. Crozier SJ, Kimball SR, Emmert SW, Anthony JC, Jefferson LS. Oral leucine administration stimulates protein synthesis in rat skeletal muscle. *J Nutr.* mars 2005;135(3):376-82.
92. Jackman SR, Witard OC, Philp A, Wallis GA, Baar K, Tipton KD. Branched-Chain Amino Acid Ingestion Stimulates Muscle Myofibrillar Protein Synthesis following Resistance Exercise in Humans. *Front Physiol* [Internet]. 7 juin 2017 [cité 10 mars 2020];8. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5461297/>
93. Negro M, Giardina S, Marzani B, Marzatico F. Branched-chain amino acid supplementation does not enhance athletic performance but affects muscle recovery and the immune system. *J Sports Med Phys Fitness.* sept 2008;48(3):347-51.
94. Parry-Billings M, Blomstrand E, McAndrew N, Newsholme EA. A communicational link between skeletal muscle, brain, and cells of the immune system. *Int J Sports Med.* mai 1990;11 Suppl 2:S122-128.

95. Bassit RA, Sawada LA, Bacurau RFP, Navarro F, Martins E, Santos RVT, et al. Branched-chain amino acid supplementation and the immune response of long-distance athletes. *Nutrition*. mai 2002;18(5):376-9.
96. EAFIT BCAA 4.1.1 (120 gélules) [Internet]. [cité 10 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/bcaa-4-1-1.html>
97. BCAA 8.1.1 Zero Vegan 500gr - 28,90 € [Internet]. Marque. [cité 10 mars 2020]. Disponible sur: [https://www.ericfavre.com/fr\\_fr/bcaa-acides-amines/bcaa-8-1-1-zero-vegan-500gr-p-137.htm?coul\\_att\\_detailID27](https://www.ericfavre.com/fr_fr/bcaa-acides-amines/bcaa-8-1-1-zero-vegan-500gr-p-137.htm?coul_att_detailID27)
98. Wilkinson DJ, Hossain T, Hill DS, Phillips BE, Crossland H, Williams J, et al. Effects of leucine and its metabolite  $\beta$ -hydroxy- $\beta$ -methylbutyrate on human skeletal muscle protein metabolism. *J Physiol*. 1 juin 2013;591(Pt 11):2911-23.
99. Manetta J. Micronutrition et nutrithérapie du sportif: [optimisation des performances] : référencement scientifique actualisé : expertise indépendante du lobbying industriel. 2017.
100. Nissen S, Sharp R, Ray M, Rathmacher JA, Rice D, Fuller JC, et al. Effect of leucine metabolite beta-hydroxy-beta-methylbutyrate on muscle metabolism during resistance-exercise training. *J Appl Physiol*. nov 1996;81(5):2095-104.
101. Gallagher PM, Carrithers JA, Godard MP, Schulze KE, Trappe SW. Beta-hydroxy-beta-methylbutyrate ingestion, Part I: effects on strength and fat free mass. *Med Sci Sports Exerc*. déc 2000;32(12):2109-15.
102. Wilson JM, Lowery RP, Joy JM, Andersen JC, Wilson SMC, Stout JR, et al. The effects of 12 weeks of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate free acid supplementation on muscle mass, strength, and power in resistance-trained individuals: a randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Eur J Appl Physiol*. juin 2014;114(6):1217-27.

103. Gerlinger-Romero F, Guimarães-Ferreira L, Giannocco G, Nunes MT. Chronic supplementation of beta-hydroxy-beta methylbutyrate (HMB) increases the activity of the GH/IGF-I axis and induces hyperinsulinemia in rats. *Growth Horm IGF Res.* avr 2011;21(2):57-62.
104. Hoffman JR, Cooper J, Wendell M, Im J, Kang J. Effects of beta-hydroxy beta-methylbutyrate on power performance and indices of muscle damage and stress during high-intensity training. *J Strength Cond Res.* nov 2004;18(4):747-52.
105. Portal S, Eliakim A, Nemet D, Halevy O, Zadik Z. Effect of HMB supplementation on body composition, fitness, hormonal profile and muscle damage indices. *J Pediatr Endocrinol Metab.* juill 2010;23(7):641-50.
106. Albert FJ, Morente-Sánchez J, Ortega FB, Castillo MJ, Gutiérrez Á. USEFULNESS OF B-HYDROXY-B-METHYLBUTYRATE (HMB) SUPPLEMENTATION IN DIFFERENT SPORTS: AN UPDATE AND PRACTICAL IMPLICATIONS. *Nutr Hosp.* 1 juill 2015;32(1):20-33.
107. HMB - Le site officiel de Scitec Nutrition® [Internet]. [cité 10 mars 2020]. Disponible sur: [https://www.scitecnutrition.com/fr/produits/scitec\\_nutrition/produits\\_speciaux/hmb](https://www.scitecnutrition.com/fr/produits/scitec_nutrition/produits_speciaux/hmb)
108. HMB [Internet]. Myprotein France. [cité 10 mars 2020]. Disponible sur: <https://fr.myprotein.com/nutrition-sportive/hmb/10636952.html>
109. Keast D, Arstein D, Harper W, Fry RW, Morton AR. Depression of plasma glutamine concentration after exercise stress and its possible influence on the immune system. *Med J Aust.* 2 janv 1995;162(1):15-8.
110. Phillips GC. Glutamine: the nonessential amino acid for performance enhancement. *Curr Sports Med Rep.* juill 2007;6(4):265-8.

111. Castell LM, Poortmans JR, Newsholme EA. Does glutamine have a role in reducing infections in athletes? *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1996;73(5):488-90.
112. Castell L. Glutamine supplementation in vitro and in vivo, in exercise and in immunodepression. *Sports Med.* 2003;33(5):323-45.
113. Carr EL, Kelman A, Wu GS, Gopaul R, Senkevitch E, Aghvanyan A, et al. Glutamine uptake and metabolism are coordinately regulated by ERK/MAPK during T lymphocyte activation. *J Immunol.* 15 juill 2010;185(2):1037-44.
114. Bowtell JL, Gelly K, Jackman ML, Patel A, Simeoni M, Rennie MJ. Effect of oral glutamine on whole body carbohydrate storage during recovery from exhaustive exercise. *J Appl Physiol.* juin 1999;86(6):1770-7.
115. Hickson RC, Czerwinski SM, Wegrzyn LE. Glutamine prevents downregulation of myosin heavy chain synthesis and muscle atrophy from glucocorticoids. *Am J Physiol.* avr 1995;268(4 Pt 1):E730-734.
116. Rowbottom DG, Keast D, Morton AR. The emerging role of glutamine as an indicator of exercise stress and overtraining. *Sports Med.* févr 1996;21(2):80-97.
117. Pure L-Glutamine, un acide aminé essentiel pour limiter le catabolisme et relancer l'anabolisme | EAFIT [Internet]. [cité 10 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/eafit-pure-l-glutamine.html>
118. Hristina K, Langerholc T, Trapecar M. Novel metabolic roles of L-arginine in body energy metabolism and possible clinical applications. *J Nutr Health Aging.* 2014;18(2):213-8.
119. Eto B, Peres G, Le Moel G. Effects of an ingested glutamate arginine salt on ammonemia during and after long lasting cycling. *Arch Int Physiol Biochim Biophys.* juin 1994;102(3):161-2.

120. Schaefer A, Piquard F, Geny B, Doutreleau S, Lampert E, Mettauer B, et al. L-arginine reduces exercise-induced increase in plasma lactate and ammonia. *Int J Sports Med.* août 2002;23(6):403-7.
121. Alba-Roth J, Müller OA, Schopohl J, von Werder K. Arginine stimulates growth hormone secretion by suppressing endogenous somatostatin secretion. *J Clin Endocrinol Metab.* déc 1988;67(6):1186-9.
122. Kanaley JA. Growth hormone, arginine and exercise. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* janv 2008;11(1):50-4.
123. Lorin J, Zeller M, Guillaud J-C, Cottin Y, Vergely C, Rochette L. Arginine and nitric oxide synthase: regulatory mechanisms and cardiovascular aspects. *Mol Nutr Food Res.* janv 2014;58(1):101-16.
124. Alvares TS, Conte CA, Paschoalin VMF, Silva JT, Meirelles C de M, Bhambhani YN, et al. Acute l-arginine supplementation increases muscle blood volume but not strength performance. *Appl Physiol Nutr Metab.* févr 2012;37(1):115-26.
125. Evans RW, Fernstrom JD, Thompson J, Morris SM, Kuller LH. Biochemical responses of healthy subjects during dietary supplementation with L-arginine. *J Nutr Biochem.* sept 2004;15(9):534-9.
126. Collier SR, Casey DP, Kanaley JA. Growth hormone responses to varying doses of oral arginine. *Growth Horm IGF Res.* avr 2005;15(2):136-9.
127. Pure L-Arginine - Améliorer la congestion musculaire à l'effort | EAFIT [Internet]. [cité 17 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/eafit-pure-l-arginine.html>

128. L-Arginine Alpha-Ketoglutarate - AAKG 2500 - 21,90 € [Internet]. Marque. [cité 17 mars 2020]. Disponible sur: [https://www.ericfavre.com/fr\\_fr/boosters-pre-work-out/l-arginine-alpha-ketoglutarate-aakg-2500-p-161.htm?coul\\_att\\_detailID0](https://www.ericfavre.com/fr_fr/boosters-pre-work-out/l-arginine-alpha-ketoglutarate-aakg-2500-p-161.htm?coul_att_detailID0)
129. Kaore SN, Amane HS, Kaore NM. Citrulline: pharmacological perspectives and its role as an emerging biomarker in future. *Fundam Clin Pharmacol.* févr 2013;27(1):35-50.
130. van de Poll MCG, Siroen MPC, van Leeuwen PAM, Soeters PB, Melis GC, Boelens PG, et al. Interorgan amino acid exchange in humans: consequences for arginine and citrulline metabolism. *Am J Clin Nutr.* janv 2007;85(1):167-72.
131. Rage No Limit - Hard Core Preworkout - 34,90 € [Internet]. Marque. [cité 24 mars 2020]. Disponible sur: [https://www.ericfavre.com/fr\\_fr/boosters-pre-work-out/rage-no-limit-hard-core-preworkout-p-442.htm?coul\\_att\\_detailID41](https://www.ericfavre.com/fr_fr/boosters-pre-work-out/rage-no-limit-hard-core-preworkout-p-442.htm?coul_att_detailID41)
132. Culbertson JY, Kreider RB, Greenwood M, Cooke M. Effects of Beta-Alanine on Muscle Carnosine and Exercise Performance:A Review of the Current Literature. *Nutrients.* 25 janv 2010;2(1):75-98.
133. Hill CA, Harris RC, Kim HJ, Harris BD, Sale C, Boobis LH, et al. Influence of beta-alanine supplementation on skeletal muscle carnosine concentrations and high intensity cycling capacity. *Amino Acids.* févr 2007;32(2):225-33.
134. Bellinger PM, Howe ST, Shing CM, Fell JW. Effect of combined  $\beta$ -alanine and sodium bicarbonate supplementation on cycling performance. *Med Sci Sports Exerc.* août 2012;44(8):1545-51.
135. Ripps H, Shen W. Review: taurine: a «very essential» amino acid. *Mol Vis.* 2012;18:2673-86.

136. Balshaw TG, Bampouras TM, Barry TJ, Sparks SA. The effect of acute taurine ingestion on 3-km running performance in trained middle-distance runners. *Amino Acids*. févr 2013;44(2):555-61.
137. Zhang M, Izumi I, Kagamimori S, Sokejima S, Yamagami T, Liu Z, et al. Role of taurine supplementation to prevent exercise-induced oxidative stress in healthy young men. *Amino Acids*. mars 2004;26(2):203-7.
138. Conte Camerino D, Tricarico D, Pierno S, Desaphy J-F, Liantonio A, Pusch M, et al. Taurine and skeletal muscle disorders. *Neurochem Res*. janv 2004;29(1):135-42.
139. Wang W, Wu Z, Dai Z, Yang Y, Wang J, Wu G. Glycine metabolism in animals and humans: implications for nutrition and health. *Amino Acids*. sept 2013;45(3):463-77.
140. Yamadera W, Inagawa K, Chiba S, Bannai M, Takahashi M, Nakayama K. Glycine ingestion improves subjective sleep quality in human volunteers, correlating with polysomnographic changes. *Sleep and Biological Rhythms*. 2007;5(2):126-31.
141. Bannai M, Kawai N. New therapeutic strategy for amino acid medicine: glycine improves the quality of sleep. *J Pharmacol Sci*. 2012;118(2):145-8.
142. Glycine [Internet]. Myprotein France. [cité 12 mars 2020]. Disponible sur: <https://fr.myprotein.com/nutrition-sportive/glycine/10530386.html>
143. Fielding R, Riede L, Lugo JP, Bellamine A. l-Carnitine Supplementation in Recovery after Exercise. *Nutrients*. 13 mars 2018;10(3).
144. Orer GE, Guzel NA. The effects of acute L-carnitine supplementation on endurance performance of athletes. *J Strength Cond Res*. févr 2014;28(2):514-9.

145. Giamberardino MA, Dragani L, Valente R, Di Lisa F, Saggini R, Vecchiet L. Effects of prolonged L-carnitine administration on delayed muscle pain and CK release after eccentric effort. *Int J Sports Med.* juill 1996;17(5):320-4.
146. EAFIT L-CARNITINE Gélules [Internet]. [cité 12 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/l-carnitine-gelules.html>
147. Quelles sont les différents types de Créatine ? [Internet]. [cité 11 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.espace-musculation.com/toutes-les-creatines.html>
148. Cooper R, Naclerio F, Allgrove J, Jimenez A. Creatine supplementation with specific view to exercise/sports performance: an update. *J Int Soc Sports Nutr.* 20 juill 2012;9(1):33.
149. Effets de la supplémentation orale en créatine sur la force musculaire et la composition corporelle. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 11 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10731009>
150. Créatine gélule, poudre ou effervescente : boostez votre entrainement [Internet]. EAFIT. [cité 24 mars 2020]. Disponible sur: <https://www.eafit.com/nos-produits/energie/creatines.html>

# TABLES DES ILLUSTRATIONS

# I. Liste des figures

FIGURE 1 : LES DIFFERENTS TYPES DE PROTEINES (3)	20
FIGURE 2: CONSTITUTION D'UN ACIDE AMINE (4)	21
FIGURE 3 : LES VINGT ACIDES AMINEES PROTEINOGENES (6)	22
FIGURE 4 : FORMATION D'UNE LIAISON PEPTIDIQUE (3)	22
FIGURE 5: LES DIFFERENTES STRUCTURES DES PROTEINES (7)	24
FIGURE 6 : SCHEMA GENERAL DU METABOLISME PROTEIQUE CHEZ L'HOMME (11)	28
FIGURE 7: L'EXPRESSION DE L'INFORMATION GENETIQUE (12)	29
FIGURE 8 : DEGRADATION DES PROTEINES PAR LE PROTEASOME (4)	30
FIGURE 9 : DESAMINATION OXYDATIVE	31
FIGURE 10 : TRANSAMINATION	32
FIGURE 11 : LES SQUELETTES CARBONES DE PLUSIEURS AA ENTRENT DANS LE CYCLE DE KREBS PAR DIFFERENTES VOIES (10)	33
FIGURE 12 : LES ALIMENTS ET LEUR INDICE PRAL (37)	45
FIGURE 13: LES TROIS TYPES DE TISSUS MUSCULAIRES (16)	49
FIGURE 14 : STRUCTURE DE BASE D'UN MUSCLE SQUELETTIQUE (16)	51
FIGURE 15 : STRUCTURE D'UNE MYOFIBRILLE (12)	51
FIGURE 16 : EVENEMENTS SURVENANT A LA JONCTION NEUROMUSCULAIRE ET ABOUTISSANT A UN POTENTIEL D'ACTION DANS LA MEMBRANE PLASMATIQUE DE LA FIBRE MUSCULAIRE (12)	54
FIGURE 17 : ACTIVATION DU CYCLE DES PONTS TRANSVERSAUX PAR LE CALCIUM (12)	55
FIGURE 18 : REPRESENTATIONS CHIMIQUE ET MECANIQUE DES QUATRE ETAPES D'UN CYCLE DE PONT TRANSVERSAL (12)	56
FIGURE 19 : LA MOLECULE D'ATP	57
FIGURE 20 : LES TROIS SOURCES DE PRODUCTION D'ATP AU COURS DE LA CONTRACTION MUSCULAIRE (12)	59
FIGURE 21 : REACTION DE LA PHOSPHOCREATINE PRODUISANT DE L'ENERGIE (8)	60
FIGURE 22 : LES DIFFERENTES REACTIONS BIOCHIMIQUES LORS DE LA GLYCOLYSE (8)	62
FIGURE 23 : LE CYCLE DE KREBS (16)	64
FIGURE 24 : SCHEMA GENERAL DE L'OXYDATION D'ATOMES D'HYDROGENE QUI S'ACCOMPAGNE D'UN TRANSPORT D'ELECTRONS (8)	65
FIGURE 25 : BILAN DE LA PRODUCTION D'ATP LORS DE L'OXYDATION D'UNE MOLECULE DE GLUCOSE (8)	65

FIGURE 26 : BILAN DE LA PRODUCTION D'ATP LORS DU CATABOLISME D'UNE MOLECULE DE TRIGLYCERIDE	67
FIGURE 27 : LOGO DE LA NORME AFNOR NF 94-001	74
FIGURE 28 : LOGO DU LABEL SPORT PROTECT	74
FIGURE 29 : LE LOGO DE LA CERTIFICATION ISO (58)	75
FIGURE 30 : VITESSES D'ASSIMILATION DES PROTEINES DE LAIT ET DES ACIDES AMINES (70)	83
FIGURE 31 : EXEMPLE DE CASEINE EN POUDRE (71,72)	84
FIGURE 32 : EXEMPLE DE PRODUIT DE BLANC D'ŒUF LIQUIDE (74)	85
FIGURE 33 : EXEMPLE DE COMPLEMENTS DE PROTEINES DE SOJA (77,78)	86
FIGURE 34 : EXEMPLE DE COMPLEMENTS AVEC DES PROTEINES VEGETALES (79,80)	87
FIGURE 35 : EXEMPLE DE GAINERS DE LA MARQUE EAFT (82,83)	88
FIGURE 36 : STRUCTURE DES TROIS ACIDES AMINES A CHAINES RAMIFIEES	91
FIGURE 37 : RESUME DES EFFETS POTENTIELS ATTENDUS DES BCAA (87)	91
FIGURE 38 : CATABOLISME DES ACIDES AMINES RAMIFIES AU NIVEAU MUSCULAIRE (4)	92
FIGURE 39 : EXEMPLE DE BCAA EN GELULE ET EN POUDRE (96,97)	94
FIGURE 40 : STRUCTURE DU HMB	94
FIGURE 41 : EXEMPLE DE COMPLEMENTS DE HMB (107,108)	95
FIGURE 42 : STRUCTURE DE LA GLUTAMINE	96
FIGURE 43 : EXEMPLE DE COMPLEMENT DE GLUTAMINE (117)	98
FIGURE 44 : STRUCTURE DE LA L-ARGININE	99
FIGURE 45 : EXEMPLES DE COMPLEMENTS D'ARGININE (127,128)	100
FIGURE 46 : LA CITRULLINE	101
FIGURE 47 : PRE-WORK-OUT DU LABORATOIRE ERIC FAVRE (131)	102
FIGURE 48 : LE CYCLE GLUCOSE-ALANINE (8)	103
FIGURE 49 : STRUCTURES DE L' $\alpha$ ET LA $\beta$ ALANINE	103
FIGURE 50 : STRUCTURE DE LA TAURINE	105
FIGURE 51 : STRUCTURE DE LA GLYCINE	106
FIGURE 52 : EXEMPLE DE COMPLEMENTS DE GLYCINE (142)	107
FIGURE 53 : STRUCTURE DE LA L-CARNITINE	108
FIGURE 54 : EXEMPLE DE COMPLEMENTS DE L-CARNITINE (146)	109
FIGURE 55 : STRUCTURES DE LA CREATINE ET LA CREATINE PHOSPHATE	110
FIGURE 56 : EXEMPLE DE COMPLEMENTS DE CREATINE (150)	113

## II. Liste des tableaux

TABLEAU 1 : LES ACIDES AMINES COMME PRECURSEURS DE COMPOSES AZOTES.....	35
TABLEAU 2 : TENEUR EN PROTEINES DE CERTAINS ALIMENTS (33).....	41
TABLEAU 3 : CLASSEMENT DE QUALITE DES PROTEINES (35,36).....	43
TABLEAU 4 : PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES FIBRES MUSCULAIRES .....	53
TABLEAU 5 : LES TROIS FILIERES PERMETTANT LA PRODUCTION DE L'ENERGIE.....	59
TABLEAU 6 : TABLEAU COMPARATIF DES WHEY PROTEINES (66,67).....	82

# ANNEXES

# Annexe 1 : brochure destinée aux sportifs mise à disposition par le Cespharm (61)

## SPORTIFS, PRÉSENTEZ-VOUS !

**LES SPORTIFS SONT RESPONSABLES DE LEURS CONSOMMATIONS EN CAS DE CONTRÔLE (CODE MONDIAL ANTIDOPAGE).**

- Vous devez donc vous assurer que les médicaments et/ou les compléments alimentaires que vous prenez ne comportent pas de substance interdite.
- Faites-vous connaître comme sportif auprès de votre pharmacien afin qu'il puisse vous apporter des conseils adaptés quant à la prise de médicaments et/ou de compléments alimentaires.

### POUR EN SAVOIR PLUS

**PROGRAMME NATIONAL NUTRITION SANTÉ :**  
<http://www.mangerbouger.fr/pnns>

**AGENCE FRANÇAISE DE LUTTE CONTRE LE DOPAGE :**  
<https://www.afld.fr/>

**ANTENNES MÉDICALES DE PRÉVENTION DU DOPAGE (AMPD) :**  
[www.ampd.fr](http://www.ampd.fr)

**COMITÉ NATIONAL OLYMPIQUE ET SPORTIF FRANÇAIS**  
<http://franceolympique.com/index.phtml>



### NORME AFNOR NF V 94-001

La norme AFNOR NF V 94-001 a été publiée en 2012 pour permettre aux sportifs de connaître les compléments ou les denrées alimentaires ne contenant pas de substances dopantes.

En adoptant cette norme, les fabricants s'engagent à garantir la composition de leurs compléments alimentaires et l'absence de substances interdites pouvant conduire à un contrôle antidopage positif.

La mention NF V 94-001 sur l'emballage des produits permet d'identifier facilement les compléments alimentaires ou denrées alimentaires dépourvus de substances dopantes.

www.afld.fr www.ampd.fr Photos : © Thinkstock

**AVIS AUX SPORTIFS !**  
**LES COMPLÉMENTS ALIMENTAIRES NE SONT PAS DES PRODUITS COMME LES AUTRES**

**POUR ÉVITER LE RISQUE DE DOPAGE ACCIDENTEL, PARLEZ-EN AVEC VOTRE PHARMACIEN**



## BESOINS NUTRITIONNELS DU SPORTIF

### LA NUTRITION EST UN ÉLÉMENT ESSENTIEL DE LA RÉUSSITE SPORTIVE.



➤ **L'alimentation doit être équilibrée et variée.**  
Dans la majorité des cas, une alimentation équilibrée et variée par les aliments courants permet d'apporter l'essentiel des nutriments nécessaires pour couvrir les besoins d'un sportif en bonne santé.

➤ Dans certaines situations particulières (pratique de certains sports, dépense énergétique très importante, environnements climatiques extrêmes...), un apport supplémentaire en vitamines, minéraux et autres nutriments par des compléments alimentaires peut être utile.

Dans ce cas, il est important de s'adresser à un professionnel de santé spécialisé en nutrition du sportif qui évaluera les besoins nutritionnels et proposera un conseil adapté.



### QU'EST-CE QU'UN COMPLÉMENT ALIMENTAIRE ?

Les compléments alimentaires sont définis comme des denrées alimentaires dont le but est de compléter un régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments (minéraux et/ou vitamines) ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique. Ils peuvent contenir des plantes ou extraits de plantes.

Ils se présentent sous la forme de comprimés, gélules, pastilles, sachets de poudre, ampoules...

Les compléments alimentaires autorisés en France doivent porter sur l'emballage la mention « complément alimentaire », le nom des nutriments ou substances qu'ils contiennent et la dose journalière recommandée.

## USAGE DE COMPLÉMENTS ALIMENTAIRES : QUELS RISQUES ?

Si l'usage de compléments alimentaires est justifié dans certaines situations, leur consommation peut également présenter des risques :



### RISQUE POUR LA SANTÉ

En cas de consommation inadaptée ou trop importante, d'association avec d'autres compléments alimentaires ou avec certains médicaments.

➤ Demandez conseil à votre pharmacien ou votre médecin pour toute prise de compléments alimentaires et/ou de médicaments.

En cas de contamination du complément alimentaire par des substances nocives.

➤ Vérifier que les compléments alimentaires sont autorisés en France.



### RISQUE DE DOPAGE ACCIDENTEL

Lié à la présence de substances dopantes pouvant conduire à un contrôle antidopage positif et des sanctions même chez un sportif de bonne foi.

➤ N'achetez pas de compléments alimentaires sur Internet sans garanties du fabricant.

➤ Privilégiez les compléments alimentaires bénéficiant de la norme AFNOR NF V94-001 garantissant l'absence de substances dopantes.

### EN PRATIQUE

✓ Prenez conseil auprès d'un professionnel de santé pour vos besoins nutritionnels.

✓ N'achetez pas de compléments alimentaires non autorisés en France ou sur internet sans garanties du fabricant. Privilégiez les compléments alimentaires bénéficiant de la norme AFNOR NF V94-001.

✓ Évitez les prises prolongées, répétées ou multiples au cours de l'année de compléments alimentaires sans vous entourer des conseils d'un professionnel de santé.

✓ Signalez à votre pharmacien ou votre médecin tout effet indésirable survenant suite à la consommation d'un complément alimentaire.

✓ Ne vous laissez pas enfermer dans une pratique sportive qui vous isole de vos proches.

DEMANDEZ CONSEIL À VOTRE PHARMACIEN OU VOTRE MÉDECIN  
POUR TOUTE PRISE DE COMPLÉMENTS ALIMENTAIRES ET/OU DE MÉDICAMENTS

## Annexe 2 : résumé des effets potentiels des acides aminés et dérivés ainsi que leur prise

	Effets potentiels	Prise
<b>BCAA</b>	Réduction de la fatigue	Avant, pendant, après l'entraînement 10g par jour
	Augmentation de la synthèse protéique musculaire	
	Inhibition de l'immunosuppression post-exercice	
<b>HMB</b>	Amélioration de la force musculaire	1 à 3g par jour
	Augmentation de la masse maigre	
	Diminution de la masse grasse	
<b>Glutamine</b>	Défenses immunitaires	5 à 10g par jour
	Élimination de l'ammoniaque	
	Récupération musculaire	
<b>Arginine</b>	Évacuation déchets métaboliques	9g par jour
	Sécrétion GH	
	Synthèse créatine	
	Synthèse NO -> vasodilatateur	
<b>Citrulline</b>	Précurseur arginine	3g par jour
<b>β-alanine</b>	Amélioration performance	3g par jour
<b>Taurine</b>	Lutte contre le stress oxydant	2 à 3g par jour
	Récupération nerveuse	
<b>Glycine</b>	Régulation métabolique	3g par jour
	Amélioration capacité antioxydante	

---

	Métabolisme des acides gras	
<b>Carnitine</b>	Amélioration performance et récupération	2g par jour
	Stimulation force musculaire	
<b>Créatine</b>	Amélioration performance Rétention d'eau sous-cutanée	3 à 5g par jour

---

VU, LE PRESIDENT DU JURY

CAEN, LE

VU, LE DIRECTEUR DE LA FACULTE  
DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES

CAEN, LE

L'université n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses et mémoires. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

---

**TITRE**

PROTEINES ET ACIDES AMINES : UTILISATIONS PAR LES SPORTIFS ET CONSEILS A L'OFFICINE

---

**Résumé**

Le sport est devenu en quelques années un élément d'un style de vie actif et sain recherché par de nombreuses personnes. Ce mode de vie actif se répercute sur l'explosion de la fréquentation des salles de remise en forme mais aussi sur la consommation de produits de nutrition sportive. Le marché de la nutrition sportive ne cesse donc de s'élargir en s'intéressant aux sportifs confirmés et professionnels mais également amateurs. Ces derniers recherchent des produits pouvant les soutenir dans leur activité sportive (gain musculaire, perte de graisse, amélioration des performances) et dans leur récupération. Parmi les produits les plus en vue, on retrouve ceux à base de protéines et d'acides aminés. Souvent commercialisés sous forme de poudre ou gélule, ils sont aussi déclinés en produits nomades comme les boissons et les barres protéinées. Le pharmacien peut choisir d'en référencer dans son officine. Il doit alors être capable de les conseiller aux sportifs selon leur situation et leurs objectifs. Cette thèse présente, dans un premier temps, la biochimie des protéines ainsi que la physiologie musculaire, puis, les différents compléments contenant des protéines et acides aminés ainsi que leurs conseils à l'officine.

---

**TITLE**

PROTEINS AND AMINO ACIDS : USES BY SPORTSMEN AND ADVICE TO THE DISPENSARY

---

**Summary**

Sport became in a few years an element of an active and healthy lifestyle sought by many people. This active lifestyle has an impact on the explosion in the use of fitness rooms but also on the consumption of sports nutrition products. The sports nutrition market is expanding by focusing on experienced and professional athletes but also amateurs. They are looking for products that can support them in their sports activity (muscle gain, fat loss, performance improvement) and in their recovery. Among the most prominent products, we find those with proteins and amino acids. Often marketed in powder or capsule forms, they are also available in nomadic products such as protein drinks and protein bars. The pharmacist can choose to reference it in his pharmacy. He must then be able to advise them to athletes according to their situation and their objectives. This thesis presents the biochemistry of proteins and muscle physiology, then the various supplements containing proteins and amino acids as well as their advice to the pharmacy.

---

**Mots-clés**

Protéines, acides aminés, sportifs, muscles, compléments alimentaires, conseils