



Université de Strasbourg  
**FACULTÉ DE PHARMACIE**

N° d'ordre :

**MÉMOIRE DE DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

—

Évaluation de l'Efficacité et de la Sécurité des Compléments Alimentaires dans  
le Développement Musculaire des Athlètes de Musculation

Présenté par SEMAAN Eric

Soutenu le 07 juillet devant le jury constitué de

Pr. MATZ-WESTPHAL Rachel, Président

Dr. TERRAND Jérôme, Directeur de thèse

Dr. EID-HOEHR Rose-Marie, Autres membres du jury

Approuvé par le Doyen et  
par le Président de l'Université de Strasbourg

# Liste du personnel enseignant



Mise à jour oct. 2024

<b>Doyen</b>	Esther KELLENBERGER
<b>Directeurs adjoints</b>	Julien GODET Béatrice HEURTAULT Emilie SICK
<b>Directeur adjoint étudiant</b>	Léo FERREIRA-MOURIAUX
<b>Responsable administrative</b>	Rachel MOUEZY

## LISTE DU PERSONNEL ENSEIGNANT

### Professeurs :

Philippe BOUCHER	Physiologie
Nathalie BOULANGER	Parasitologie
Line BOUREL	Chimie thérapeutique
Pascal DIDIÉ	Biophotonique
Said ENNAMAR	Chimie analytique
Valérie GEOFFROY	Microbiologie
Philippe GEORGEL	Bactériologie, Virologie
Béatrice HEURTAULT	Pharmacie galénique
Esther KELLENBERGER	Bio-Informatique
Maxime LEHMANN	Biologie cellulaire
Eric MARCHIONI	Chimie analytique
Rachel MATZ-WESTPHAL	Pharmacologie
Francis MÉGERLIN	Droit et économie pharm.
Yves MELY	Physique et Biophysique
Nathalie NIEDERHOFFER	Pharmacologie
Jean-Yves PABST	Droit Economie pharm.
Françoise PONS	Toxicologie
Valérie SCHINI-KERTH	Pharmacologie
Florence TOTI	Pharmacologie
Thierry VANDAMME	Biogalénique
Catherine VONTHRON	Pharmacognosie
Rascal WENRLÉ	Pharmacie galénique

### Professeurs-praticiens hospitaliers

Julien GODET	Biostatistiques - science des données
Jean-Marc LESSINGER	Biochimie
Bruno MICHEL	Pharm. clinique santé publique
Pauline SOULAS-SPRAUEL	Immunologie
Geneviève UBEAUD-SÉQUIER	Pharmacocinétique

### Enseignants contractuels

Alexandra CHAMPERT	Pharmacie d'officine
Matthieu FOHRER	Pharmacie d'officine
Philippe GALAIS	Droit et économie pharm.
Philippe NANDE	Ingénierie pharmaceutique
Caroline WENRLÉ	Pharmacie d'officine

### Maîtres de Conférences :

Nicolas ANTON	Pharmacie biogalénique
Fareeha BATOOL	Biochimie
Martine BERGAENTZLÉ	Chimie analytique
Elisa BOMBARDA	Biophysique
Aurélié BOURDERIOUX	Pharmacochimie
Emmanuel BOUTANT	Virologie et Microbiologie
Véronique BRUBAN	Physiologie et physiopath.
Anne CASSET	Toxicologie
Thierry CHATAIGNÉAU	Pharmacologie
Manuela CHIEPÉ	Pharmacie biogalénique
Guillaume CONZATTI	Pharmacie galénique
Félicie COTTARD	Biotechnologie pharmaceutique
Marcella DE GIORGI	Pharmacochimie
Serge DUMONT	Biologie cellulaire
Gisèle HAAN-ARCHIPOFF	Plantes médicinales
Célie JACQUEMARD	Chémoinformatique
Julie KARPENKO	Pharmacochimie
Sergio ORTIZ AGUIRRE	Pharmacognosie
Sylvie PERROTEY	Parasitologie
Romain PERTSCH	Chimie en flux
Frédéric PRZYBILLA	Biostatistiques
Patrice RASSAM	Microbiologie
Eléonore REAL	Biochimie
Andreas REISCH	Biophysique
Ludivine RIFFAULT-VALOIS	Analyse du médicament
Carole RONZANI	Toxicologie
Emilie SICK	Pharmacologie
Yaouba SOUAIBOU	Pharmacognosie
Maria-Vittoria SPANEDDÀ	Chimie thérapeutique
Jérôme TERRAND	Physiopathologie
Nassera TOUNSI	Chimie physique
Aurélié URBAIN	Pharmacognosie
Bruno VAN OVERLOOP	Physiologie
Maria ZENIOU	Chimiogénomique

### Maîtres de conférences - praticiens hospitaliers

Julie BRUNET	Parasitologie
Pierre COLLIAT	Pharmacie clinique
Neily ÉTIENNE-SELLOUM	Pharmacologie- pharm. clinique
Vincent GIES	Immunologie
Damien REITA	Biochimie

### Assistants hospitaliers universitaires

Abdelmalek BENDJAMA	Production de méd. anticancéreux
Maxime PETIT	Pharmacotechnie

# Serment de Galien



## SERMENT DE GALIEN



### JE JURE,

en présence des Maîtres de la Faculté,  
des Conseillers de l'Ordre des Pharmaciens  
et de mes condisciples :

D'honorer ceux qui m'ont instruit  
dans les préceptes de mon art et de  
leur témoigner ma reconnaissance en  
restant fidèle à leur enseignement ;

D'exercer, dans l'intérêt de la santé publique,  
ma profession avec conscience et de respecter non  
seulement la législation en vigueur, mais aussi les règles  
de l'honneur, de la probité et du désintéressement ;

De ne dévoiler à personne les secrets  
qui m'auront été confiés et dont j'aurai eu  
connaissance dans la pratique de mon art.

Si j'observe scrupuleusement ce serment,  
que je sois moi-même honoré  
et estimé de mes confrères  
et de mes patients.

## Remerciements

Au terme de ce travail de thèse, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours.

Je remercie tout d'abord mon directeur de thèse, Dr. TERRAND Jérôme pour sa confiance, ses conseils avisés, sa patience et son soutien constant. Son encadrement rigoureux et bienveillant a été déterminant pour l'aboutissement de ce travail.

Je remercie également Madame Rachel MATZ-WESTPHAL, présidente du jury, pour l'honneur qu'elle me fait en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour l'intérêt qu'elle lui porte.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement Madame Rose-Marie EID-HOEHR, qui a représenté bien plus qu'un simple membre du jury. Depuis ma deuxième année de pharmacie, elle a été une guide précieuse, un mentor exigeant et bienveillant, et a occupé une place essentielle dans mon parcours académique et professionnel. Son accompagnement attentif et ses conseils éclairés ont profondément marqué mon évolution.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers ma famille, qui a toujours été un soutien précieux tout au long de ce parcours. À mes parents, je dois une gratitude infinie pour leur amour inconditionnel, leur confiance et les valeurs solides qu'ils m'ont transmises, lesquelles ont éclairé chacune de mes étapes. Je remercie également mes frères et ma sœur pour leur soutien ainsi que leur encouragement.

Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à ce travail, par un mot, un sourire, une discussion ou une aide ponctuelle. Votre présence a compté plus que vous ne pouvez l'imaginer.

## Table des matières

Liste du personnel enseignant .....	2
Serment de Galien .....	3
Remerciements .....	4
Table des matières .....	5
Liste des abréviations .....	8
Liste des figures .....	10
I. Introduction : .....	12
II. Physiologie Musculaire et Métabolisme Énergétique.....	14
A. Anatomie et physiologie des muscles.....	14
1. Anatomie des muscles .....	14
2. La contraction musculaire .....	16
B. Métabolisme énergétique.....	20
1. La filière anaérobie alactique .....	21
2. La filière anaérobie lactique .....	23
3. La filière oxydative .....	24
a. Glycolyse .....	24
b. Cycle de Krebs (mitochondrie).....	25
c. Phosphorylation oxydative (membrane mitochondriale interne) .....	25
C. Mécanismes de l'hypertrophie musculaire.....	27
1. L'hypertrophie « myofibrillaire ».....	28
2. L'hypertrophie « sarcoplasmique » .....	30
3. Optimisation de l'Hypertrophie : Volume ou Intensité ?.....	31
III. Les Macronutriments et Micronutriments .....	34
A. Protéines .....	34
1. Sources de protéines .....	36
d. Protéines d'origine animales .....	36
e. Protéines d'origine végétales.....	36
2. Apport journalier en protéines.....	39
B. Glucides .....	39
1. Index Glycémique (IG) .....	40
2. Charge Glycémique (CG).....	41

C.	Lipides .....	41
1.	Les Acides gras saturés (AGS).....	42
2.	Les acides gras monoinsaturés (AGMI) .....	42
3.	Les acides gras polyinsaturés (AGPI) .....	42
4.	Apport journalier et complémentation en lipides .....	43
D.	Micronutriments .....	44
1.	Les vitamines.....	44
a.	La vitamine D .....	46
b.	La vitamine C .....	47
2.	Les minéraux et oligo-éléments.....	48
a.	Le magnésium.....	49
b.	Le zinc .....	51
IV.	Les Compléments Alimentaires les Plus Utilisés en Musculation.....	53
A.	Protéine du lactosérum (Whey Protéine).....	53
1.	Sécurité et Efficacité : .....	55
B.	Créatine.....	59
1.	Origine de la créatine corporelle .....	59
2.	Transport de la créatine vers les organes cibles .....	60
3.	Devenir et rôle de la créatine dans les cellules.....	61
4.	Utilisation et sécurité de la créatine .....	64
a.	La créatine entraîne-t-elle la rétention d'eau ? .....	65
b.	La créatine est-elle un stéroïde anabolisant ? .....	66
c.	La créatine provoque-t-elle des lésions rénales/un dysfonctionnement rénal ?	67
d.	Une « phase de charge » de créatine est-elle nécessaire ?.....	68
e.	La créatine provoque-t-elle la perte de cheveux / la calvitie ? .....	69
C.	BCAA (Acides Aminés à Chaîne Ramifiée) .....	71
D.	Collagènes .....	73
1.	Origine du collagène .....	74
2.	Différence entre le collagène bovin et marin .....	74
3.	Sécurité et efficacité .....	75
E.	Arginine et Citrulline.....	78
1.	Différence entre Arginine et Citrulline.....	78
2.	Sécurité et efficacité .....	80
V.	Conclusion .....	82

Bibliographie..... 84

## Liste des abréviations

- **HIIT** : High-Intensity Interval Training
- **BCAA** : Acides Aminés à Chaîne Ramifiée
- **AAE** : Acide Aminés Essentiels
- **ACh** : Acétylcholine
- **RS** : Réticulum Sarcoplasmique
- **ATP** : Adénosine Triphosphate
- **PCr.** : phosphocréatine
- **CK** : Créatine Phosphokinase
- **NAD<sup>+</sup>** : nicotinamide adénine dinucléotide
- **LDH** : Lactate Déshydrogénase
- **mTOR** : mammalien target of rapamycine.
- **LAT-1** : L-type amino acid transporter 1
- **RM** : une répétition max).
- **PDCAAS** : Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score
- **ANSES** : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail)
- **IG** : index glycémique
- **CG** : charge glycémique
- **AGS** : Acides gras saturés
- **AGMI** : Acides gras monoinsaturés
- **AGPI** : Acides gras polyinsaturés
- **LA** : acide linoléique,
- **ALA** : acide alpha-linolénique,
- **AFSSA** : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments
- **MPS** : synthèse protéique
- **AGAT** : arginine-glycine amidinotransférase
- **GAMT** : guanidino-acétate méthyltransférase
- **CRT** : transporteurs de créatine
- **ISSN** : Société Internationale de Nutrition Sportive
- **AFLD** : Agence Française de Lutte contre le Dopage
- **AMA** : Agence Mondiale Antidopage

- **DHT** : dihydrotestostérone
- **INSERM** : Institut national de la santé et de la recherche médicale
- **NOS** : *oxyde nitrique synthase*
- **EVA** : échelle visuelle analogique

## Liste des figures

Figure 1 : Structures des différents types de muscles (1).....	15
Figure 2 : Architecture du muscle strié squelettique (2) .....	15
Figure 3: Composition d'une fibre musculaire (3).....	16
Figure 4 : Connexion entre un motoneurone et des fibres musculaires (4).....	17
Figure 5 : Les séquences d'événements se produisant lorsqu'un motoneurone stimule la contraction d'une fibre musculaire (5) .....	18
Figure 6 : Propagation du potentiel d'action à travers le RS (6).....	19
Figure 7: Le principe physiologique de la contraction musculaire (7).....	20
Figure 8 : Molécule d'ATP .....	20
Figure 9 : La courbe de Howald sur fonctionnement des trois filières énergétiques (9).....	21
Figure 10: Interaction phosphocréatine-ATP (10) .....	22
Figure 11: Glycolyse anaérobie lactique (12) .....	23
Figure 12: Devenir du pyruvate dans la mitochondrie - Cycle de Krebs (14) .....	25
Figure 13 : La phosphorylation oxydative (14).....	26
Figure 14 : Hypertrophie myofibrillaire et sarcoplasmique (18) .....	27
Figure 15: Schéma montrant l'activation de mTOR après un exercice de résistance et sous l'effet des acides aminés (20).....	29
Figure 16 : Tableau des 20 acides aminés dont <b>9 essentiels</b> (32).....	34
Figure 17 : Les valeurs PDCAAS de quelques aliments (35) .....	37
Figure 18 : Tableau des Anti-nutriments : Effets sur l'Absorption des Nutriments (38) .....	38
Figure 19 : Le devenir des AGPI oméga-3 et oméga-6 (47) .....	43
Figure 20 : Les 13 Vitamines : Fonctions, sources et conséquences des carences (52).....	45
Figure 21 : Recommandations de l'ANSES pour la vitamine D (51) .....	47
Figure 22 : Comparaison des différentes formes de magnésium : teneur en magnésium et biodisponibilité (60) .....	50
Figure 23 : Tableau comparatif des différents types de protéines de lactosérum .....	54
Figure 24: Structure chimique et voie biochimique pour la synthèse de la créatine (78) .....	59
Figure 25: Transport de la créatine .....	60
Figure 26 : Cheminement de la créatine (82).....	61
Figure 27 : Système créatine / phosphocréatine /créatine kinase (83) .....	62
Figure 28: Différentes stratégies de supplémentation en créatine (79).....	69
Figure 29 : Comparaison deux compléments alimentaires : BCAA et EAA (101).....	73

Figure 30 : Intervention de la vitamine C comme cofacteur dans la synthèse du collagène(104)	
.....	75
Figure 31 : Devenir de l'arginine dans le foie (109) .....	79
Figure 32 : Devenir de la citrulline apportée par voie orale.....	80

## **I. Introduction :**

La musculation s'est imposée ces dernières années comme l'une des pratiques sportives les plus populaires, traduisant une volonté croissante des individus de prendre soin de leur santé, d'améliorer leur condition physique et de renforcer leur apparence corporelle. Ce phénomène s'inscrit dans un contexte sociétal où la recherche de performance, de bien-être et d'esthétique corporelle occupe une place de plus en plus importante, en particulier chez les jeunes adultes.

L'accessibilité des salles de sport, la diffusion massive des contenus liés au fitness sur les réseaux sociaux, ainsi que la valorisation d'un mode de vie actif ont largement contribué à l'essor de cette discipline.

Pratiquée en amateur comme en compétition, la musculation repose sur divers types d'entraînement adaptés à des objectifs spécifiques. L'entraînement en résistance, le plus courant, vise l'hypertrophie musculaire via des charges modérées à lourdes. L'entraînement en force utilise des charges très élevées pour stimuler le système neuromusculaire, tandis que les méthodes à haute intensité, comme le HIIT (High-Intensity Interval Training), combinent effort cardiovasculaire et renforcement musculaire pour améliorer l'endurance, la capacité de récupération et l'oxydation des graisses.

En parallèle de cette tendance, le recours aux compléments alimentaires s'est fortement développé. Ces produits, disponibles en pharmacies, en magasins spécialisés ou en ligne, sont largement utilisés dans le milieu sportif pour soutenir les performances, optimiser la récupération et favoriser la prise de masse musculaire.

Parmi ces produits, les plus couramment utilisés sont les protéines en poudre, la créatine, les acides aminés branchés (BCAA), les pré-workouts, ainsi que les vitamines et minéraux, qui figurent parmi les substances les plus plébiscitées par les pratiquants.

Néanmoins, cette consommation, parfois réalisée sans encadrement professionnel, soulève des questions en matière d'efficacité réelle, de sécurité d'usage et de régulation sanitaire.

En tant que professionnel de santé de proximité, le pharmacien occupe une position privilégiée pour accompagner les usagers dans un usage éclairé et sécurisé des compléments alimentaires. Il joue un rôle déterminant dans la lutte contre la désinformation, la prévention de l'automédication, et la déclaration des effets indésirables dans le cadre du dispositif de

nutriviilage. C'est dans cette optique que s'inscrit cette thèse, qui vise à analyser l'efficacité réelle et la sécurité d'utilisation des principaux compléments alimentaires employés dans le développement musculaire.

## II. Physiologie Musculaire et Métabolisme Énergétique

### A. Anatomie et physiologie des muscles

#### 1. Anatomie des muscles

Le corps humain compte plus de **600 muscles**, dont environ **90 % sont des muscles squelettiques**. Ces muscles se présentent sous différentes formes, ce qui permet de les classer selon leur morphologie :

- **Muscles longs** : principalement présents dans les membres (ex : biceps brachial, quadriceps).
- **Muscles mixtes** : localisés au niveau du tronc (ex : les muscles abdominaux)
- **Muscles courts** : souvent trouvés autour des articulations.

Cependant, au-delà de cette classification morphologique, il existe trois grands types de muscles selon leur composition histologique et leur fonction (1) :

- **Muscles lisses** : Ces muscles sont responsables des contractions involontaires ou inconscientes comme la vasomotricité. On les retrouve dans les parois des vaisseaux sanguins et des organes internes, sous le contrôle du système nerveux autonome.
- **Muscle cardiaque (myocarde)** : Ce muscle strié a une contraction spontanée et rythmique. Bien qu'il partage certaines caractéristiques avec les muscles squelettiques (notamment la striation), sa contraction reste involontaire et est contrôlée par le système nerveux autonome.
- **Muscles striés squelettiques** : Ces muscles, sous le contrôle du système nerveux somatique, permettent les mouvements volontaires du squelette. Ce sont eux qui assurent la motricité du corps et participent au maintien de la posture. Ce sont ces muscles squelettiques que nous allons examiner plus en détail.

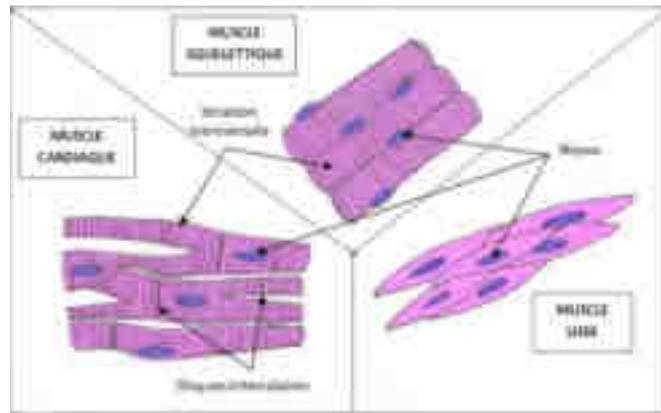


Figure 1 : Structures des différents types de muscles (1)

Les **muscles squelettiques** sont les principaux responsables de la locomotion. Ils sont attachés aux os par des **tendons**, et lorsque les muscles se contractent sous l'action du système nerveux, ils génèrent une **force mécanique** qui déplace les os, produisant ainsi le mouvement.

Anatomiquement, un muscle squelettique est entouré par plusieurs **membranes conjonctives** :

- **L'épimysium** : une membrane externe qui entoure tout le muscle.
- **Le périmysium** : une couche interne qui divise le muscle en faisceaux de fibres musculaires et qui contient les vaisseaux sanguins nécessaires à la vascularisation du tissu musculaire.
- **L'endomysium** : une fine couche de tissu conjonctif entourant chaque fibre musculaire à l'intérieur des faisceaux de fibres musculaires.

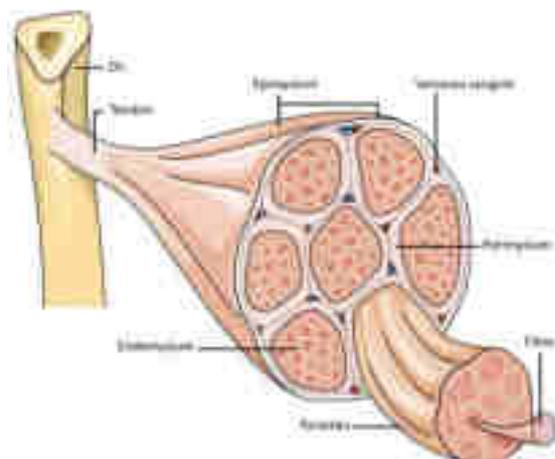


Figure 2 : Architecture du muscle strié squelettique (2)

Chaque **fibre musculaire** (ou cellule musculaire) est une cellule plurinucléée enveloppée par une membrane appelée **sarcolemme**. Ces fibres contiennent des structures cylindriques nommées **myofibrilles**, baignées dans un cytoplasme spécifique appelé **sarcoplasme**. Chaque myofibrille est composée d'unités contractiles fondamentales appelées **sarcomères**. Les sarcomères sont constitués de plusieurs types de protéines : des **filaments d'actine** (fins) et des **filaments de myosine** (épais), dont l'organisation permet d'assurer la contraction musculaire.

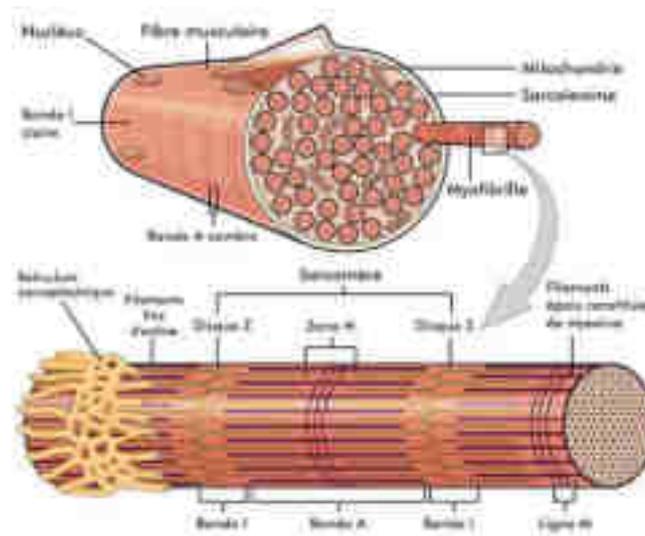


Figure 3: Composition d'une fibre musculaire (3)

## 2. La contraction musculaire

À l'exception des réflexes, toutes les contractions des muscles squelettiques sont déclenchées par un effort conscient provenant du cerveau. Celui-ci envoie des signaux électrochimiques via le système nerveux somatique jusqu'aux motoneurones, qui innervent les fibres musculaires. Un motoneurone peut, grâce à ses multiples terminaisons axonales, contrôler plusieurs fibres musculaires, les faisant se contracter simultanément. La connexion entre la terminaison axonale du motoneurone et une fibre musculaire se produit au niveau de la jonction neuromusculaire, une synapse chimique où le motoneurone transmet un signal à la fibre pour déclencher la contraction musculaire.

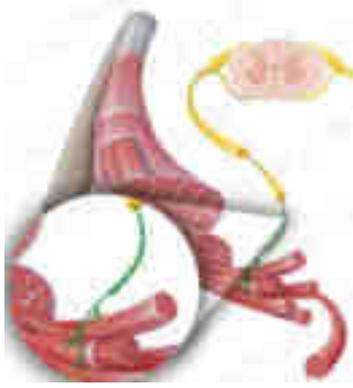


Figure 4 : Connexion entre un motoneurone et des fibres musculaires (4)

Le processus de transmission du signal à la jonction neuromusculaire commence lorsqu'un potentiel d'action est initié dans le corps cellulaire du motoneurone. Ce potentiel se propage le long de l'axone jusqu'à la terminaison axonale. Une fois arrivé à l'extrémité de l'axone, le potentiel d'action provoque la libération du neurotransmetteur acétylcholine (ACh) à partir des vésicules synaptiques dans la terminaison axonale. L'ACh diffuse à travers la fente synaptique et se lie aux récepteurs spécifiques situés sur le sarcolemme (la membrane de la fibre musculaire), déclenchant ainsi la contraction musculaire. Cette contraction est initiée par la dépolarisation du sarcolemme, causée par l'entrée d'ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) à travers les canaux sodiques associés aux récepteurs de l'ACh. Le processus de dépolarisation et de repolarisation de la membrane se déroule très rapidement, comme en témoigne la rapidité avec laquelle nous pouvons effectuer un mouvement volontaire, tel que claquer des doigts.

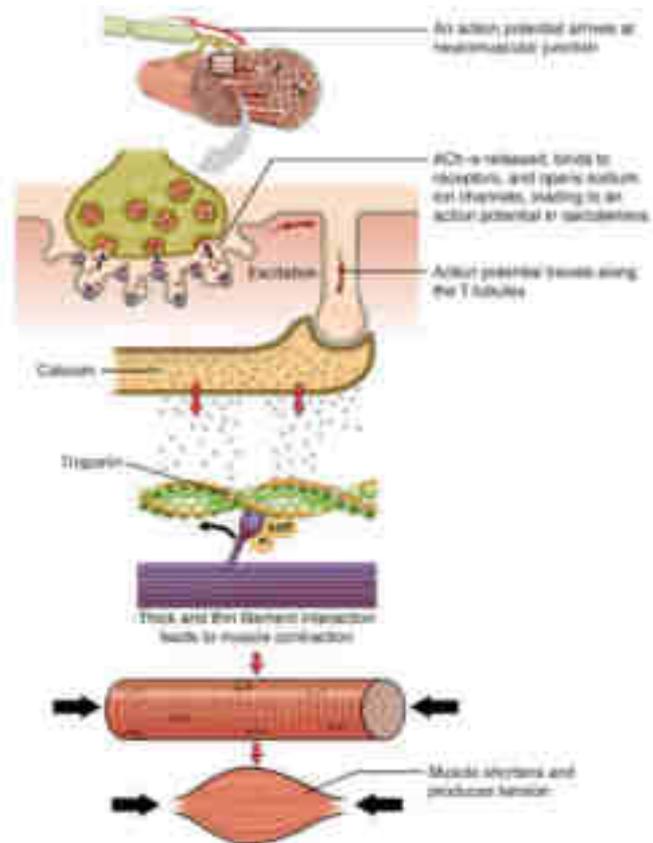


Figure 5 : Les séquences d'événements se produisant lorsqu'un motoneurone stimule la contraction d'une fibre musculaire (5)

Le potentiel d'action se propage ensuite le long de la membrane de la fibre musculaire, appelée sarcolemme, et pénètre dans des structures spécialisées nommées tubules en T. Ces tubules en T acheminent le signal vers le réticulum sarcoplasmique (RS), une structure interne qui stocke les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et qui entoure les myofibrilles. Lorsque le potentiel d'action atteint le réticulum sarcoplasmique, il provoque l'ouverture des canaux calciques, libérant des ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dans le sarcoplasme.

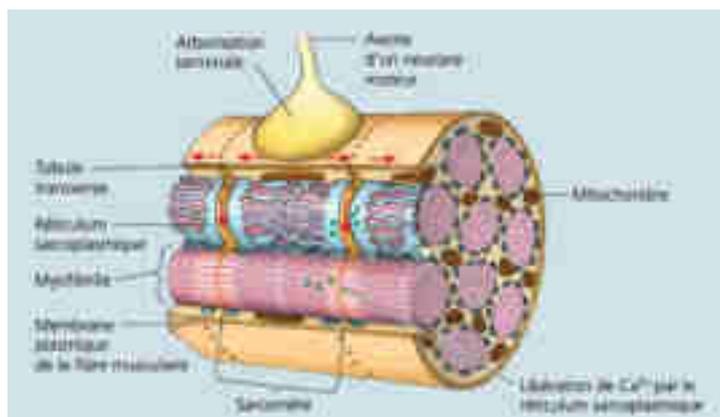


Figure 6 : Propagation du potentiel d'action à travers le RS (6)

Les ions calcium libérés se lient à une protéine régulatrice présente sur les filaments fins d'actine, appelée troponine. Cette liaison entraîne un changement de conformation de la troponine, ce qui provoque le déplacement d'une autre protéine, la tropomyosine, qui bloque normalement les sites de liaison sur l'actine. Lorsque la tropomyosine est déplacée, les sites de liaison sur l'actine deviennent accessibles aux têtes de myosine, situées sur les filaments épais.

Avant que la tête de myosine ne se lie à l'actine, elle doit être "armée". L'ATP se fixe à la tête de myosine, qui est alors détachée de l'actine. L'ATP est hydrolysée en ADP et phosphate inorganique (Pi), fournissant l'énergie nécessaire pour repositionner la tête de myosine dans une conformation prête à se lier à l'actine. Une fois que la tête de myosine s'est fixée à l'actine et a effectué un coup de force (en tirant le filament d'actine vers le centre du sarcomère), l'ADP et le Pi sont libérés. Pour que la tête de myosine se détache de l'actine, une nouvelle molécule d'ATP doit se lier à elle. Cela permet à la tête de myosine de se décrocher de l'actine et de se préparer pour un nouveau cycle de contraction. Ainsi, chaque filament d'actine est relié à un disque Z, qui marque les extrémités de chaque sarcomère (voir figure 3). Lorsque les filaments glissent, les disques Z se rapprochent, ce qui réduit la longueur des sarcomères et provoque ainsi la contraction du muscle (5)

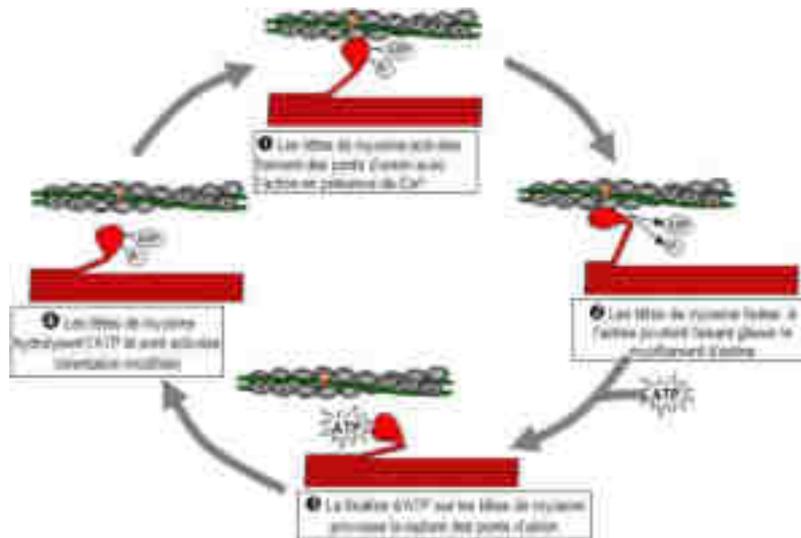


Figure 7: Le principe physiologique de la contraction musculaire (7)

## B. Métabolisme énergétique

L'ensemble de l'énergie nécessaire au fonctionnement du corps humain est contenu dans les molécules d'ATP (Adénosine Triphosphate) qui est un composé hautement énergétique.

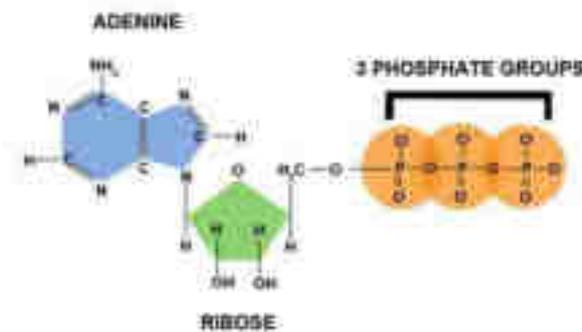


Figure 8 : Molécule d'ATP

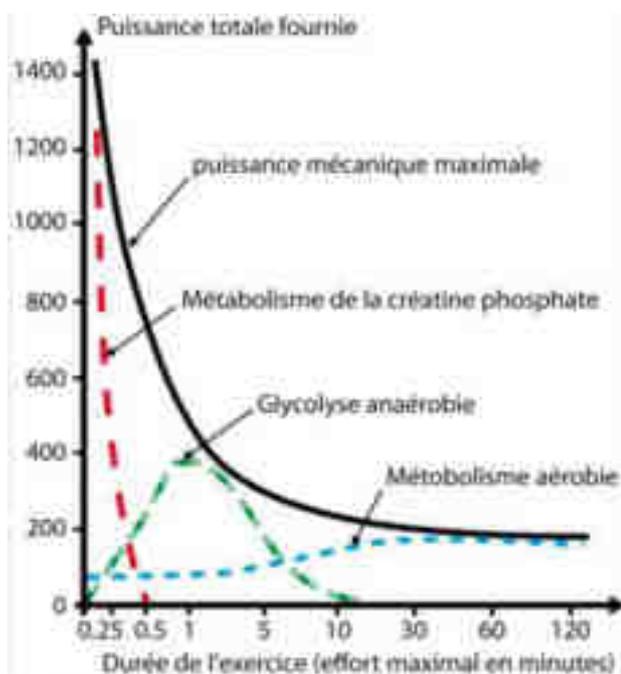
Cet **ATP** est la principale source d'énergie utilisée par les cellules pour accomplir diverses fonctions, notamment la contraction musculaire. Il joue un rôle central dans presque toutes les activités cellulaires nécessitant de l'énergie, que ce soit pour des processus métaboliques, la synthèse des molécules, ou la régulation des fonctions vitales.

Dans le contexte des muscles, l'ATP est essentiel pour permettre aux fibres musculaires de se contracter et de se relâcher. Chaque mouvement, qu'il soit involontaire ou conscient, dépend de la disponibilité de l'ATP. Cependant, la quantité d'ATP utilisable pour la contraction musculaire est très limitée et ne peut soutenir l'effort que pendant quelques secondes. Pour maintenir

l'activité musculaire, l'organisme doit constamment régénérer cette molécule à travers différentes voies métaboliques.

Il existe trois filières de reconstitution de l'ATP utilisable selon l'intensité et la durée de l'effort (8) :

- La **filière anaérobie alactique** : elle n'utilise pas d'oxygène et ne produit pas d'acide lactique, c'est la voie de la créatine phosphate ou phospho-créatine (ex : le sprint 100m)
- La **filière anaérobie lactique** : elle fonctionne sans oxygène et produit de l'acide lactique en utilisant le glucose, c'est la voie glycolytique (ex : le 400m en athlétisme)
- La **filière aérobie ou système oxydatif** : c'est aussi la voie glycolytique mais elle utilise de l'oxygène et elle correspond à l'oxydation des glucides, des lipides, et des protéines sans productions d'acide lactique. (ex : le marathon)



- En rouge : la filière Anaérobie alactique
- En vert : la filière Anaérobie lactique
- En bleu : la filière Aérobie

Figure 9 : La courbe de Howald sur fonctionnement des trois filières énergétiques (9)

### 1. La filière anaérobie alactique

Dans la voie anaérobie alactique, l'objectif est de régénérer rapidement de l'ATP à partir de l'ADP en transférant un **groupe phosphate** provenant de la phosphocréatine (PCr).

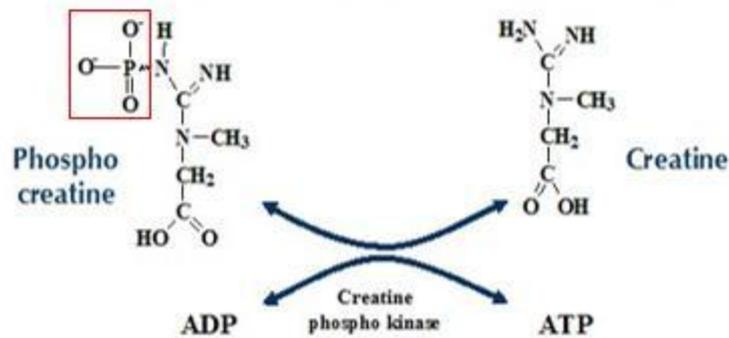


Figure 10: Interaction phosphocréatine-ATP (10)

Ce processus est catalysé par une enzyme clé, la créatine phosphokinase (CK). La PCr, présente en quantité relativement importante dans les cellules musculaires, agit comme un réservoir d'énergie immédiat. Cette voie énergétique est particulièrement efficace au tout début de l'exercice (voir Figure 9), car elle permet de fournir rapidement l'énergie nécessaire à des efforts explosifs et de courte durée comme un départ de sprint (environ 10 à 15 secondes d'effort maximal).

La réaction est rapide, car elle ne nécessite pas d'oxygène et n'entraîne pas de production de lactate, d'où le terme "alactique". Cependant, les réserves de PCr sont limitées, ce qui fait que ce système est vite épuisé, notamment lors d'exercices très intenses.

60 % de la créatine musculaire est stockée sous forme de PCr, tandis que 40 % est présente sous forme de créatine libre. La conversion de cette créatine libre en PCr nécessite de l'ATP, qui provient principalement du métabolisme aérobie. Ce dernier dépend de l'oxygène, dont la disponibilité est réduite pendant un effort intense.

Ainsi, après une utilisation rapide des réserves de PCr, le corps a besoin d'un temps de récupération (généralement de 30 secondes à plusieurs minutes) pour que l'ATP généré par la voie oxydative permette la reconversion de la créatine en PCr (11). Pendant l'effort intense, l'oxygène n'est pas disponible en quantité suffisante pour régénérer efficacement la phosphocréatine, ce qui explique pourquoi cette voie énergétique ne peut soutenir que des efforts intenses de très courte durée. Ce qui en fait une source d'énergie idéale pour des activités de haute intensité et brèves, comme un sprint ou une répétition de force maximale en musculation.

En résumé, bien que la voie anaérobie alactique soit la plus rapide pour fournir de l'énergie, elle est également la plus limitée en termes de durée, ne pouvant soutenir les muscles que pendant un effort très court.

## 2. La filière anaérobie lactique

Lorsque les réserves de phosphocréatine sont épuisées et que le système ATP-PCr ne peut plus soutenir l'effort intense, le corps active un autre mécanisme pour continuer à fournir de l'énergie rapidement : **la glycolyse anaérobie lactique**. Ce système intervient principalement lors d'exercices intenses dont la durée dépasse les 10 à 15 secondes, jusqu'à environ 2 minutes. Cette filière nécessite l'utilisation du glucose présent dans le sang ou des réserves de glycogènes musculaire (glycogénolyse). Ce glucose va subir la glycolyse qui est une succession de réaction enzymatique à l'origine du pyruvate. Pour chaque molécule de glucose utilisée, deux pyruvates sont obtenus, ce qui permet de générer rapidement **2 molécules d'ATP**.

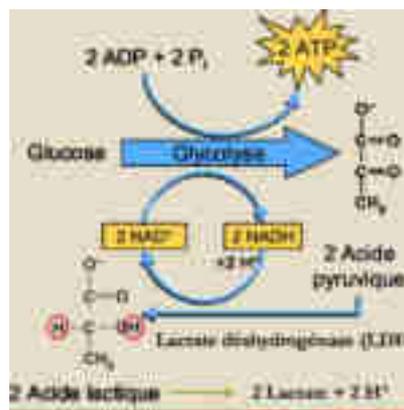


Figure 11: Glycolyse anaérobie lactique (12)

Mais en l'absence d'oxygène, le pyruvate ne peut pas être acheminé vers les mitochondries pour alimenter le cycle de Krebs, qui permet la production d'ATP de façon plus durable et efficace. Ainsi ce dernier ne pouvant être oxydé par les mitochondries, s'accumule dans le cytoplasme de la cellule musculaire.

La glycolyse dépend d'un cofacteur essentiel, le NAD<sup>+</sup> (**nicotinamide adénine dinucléotide**), qui est réduit en NADH lors de la dégradation du glucose. Pour que la glycolyse puisse continuer (anaérobie ou aérobie), le NADH doit être recyclé en NAD<sup>+</sup>, car ce dernier est indispensable pour chaque nouveau cycle de glycolyse. En situation anaérobie, sans oxygène, le corps utilise la voie de la fermentation lactique : le NADH transfère ses électrons au pyruvate

grâce à l'enzyme lactate déshydrogénase (LDH) pour former du **lactate**, ce qui régénère le  $\text{NAD}^+$ .

Cette production de lactate est accompagnée d'une accumulation de protons ( $\text{H}^+$ ) et donc une baisse du pH musculaire. La baisse du pH musculaire, dû à l'accumulation de  $\text{H}^+$ , connue sous « l'acidose musculaire » perturbe les enzymes glycolytiques et les protéines contractiles des muscles, limitant l'efficacité de la contraction musculaire et provoquant une fatigue et une sensation de brûlure (13)

### 3. La filière oxydative

Après un effort intense où la glycolyse anaérobie lactique est mobilisée pour répondre rapidement aux besoins énergétiques, la production de lactate et l'accumulation de protons ( $\text{H}^+$ ) dans le muscle finissent par limiter l'intensité de l'exercice. Pour soutenir l'effort de manière prolongée (plus de 2 minutes jusqu'à plusieurs heures), le corps active alors un système plus efficace et durable : la **filière aérobie**.

Contrairement à la glycolyse anaérobie, la voie aérobie se déroule **en présence d'oxygène** et comprend **trois grandes étapes** : glycolyse, cycle de Krebs et phosphorylation oxydative.

A noter que les glucides sont généralement privilégiés lors d'exercices courts et intenses, tandis que les graisses sont utilisées lors d'efforts prolongés et modérés.

#### a. Glycolyse

Le glucose est transformé en **2 pyruvates**, produisant **2 ATP et 2 NADH**. Les pyruvates pénètrent ensuite dans la mitochondrie, où ils sont convertis en **2 acétyl-CoA**, avec libération de **2  $\text{CO}_2$  et 2 NADH**.

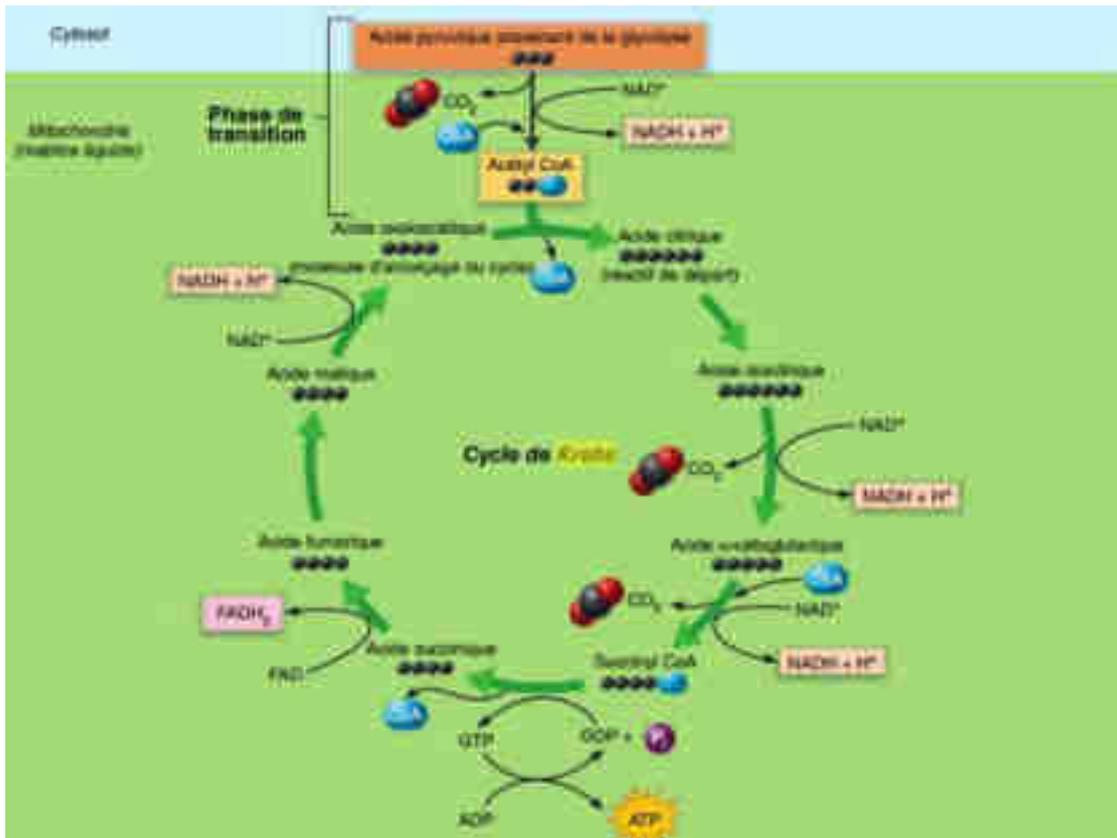


Figure 12: Devenir du pyruvate dans la mitochondrie - Cycle de Krebs (14)

b. Cycle de Krebs (mitochondrie)

Chaque acétyl-CoA rejoint l'**oxaloacétate** pour former du citrate, qui subit une série de transformations régénérant l'oxaloacétate.

Bilan pour 2 acétyl-CoA : **4 CO<sub>2</sub>, 6 NADH, 2 FADH<sub>2</sub> et 2 ATP**

c. Phosphorylation oxydative (membrane mitochondriale interne)

Les coenzymes réduits (NADH, FADH<sub>2</sub>) générées dans les étapes précédentes, cèdent leurs électrons à la **chaîne respiratoire**, qui pompe des protons (H<sup>+</sup>) dans l'espace intermembranaire:

- Complexe I : 4 H<sup>+</sup> (NADH)
- Complexe II : 0 H<sup>+</sup> (FADH<sub>2</sub>)
- Complexe III : 4 H<sup>+</sup>
- Complexe IV : 2 H<sup>+</sup>

Ce pompage crée un **gradient de protons** qui engendre une différence de charge et de concentration de chaque côté de la membrane interne mitochondriale.

Ce **gradient de protons** est utilisé par l'**ATP synthase (Complexe V)** pour produire de l'ATP. Il est important de savoir que 4 protons au total sont nécessaires à la synthèse d'un ATP (3 pour l'ATP synthase et 1 pour le transport de l'ADP et le phosphate (Pi) dans la matrice mitochondriale).

De même il faut savoir que le **NADH** permet donc le transport de **10 protons** (complexe I + III + IV) de la matrice mitochondriale à l'espace intermembranaire, tandis que le **FADH<sub>2</sub>** de seulement **6 protons** (complexe III + IV) (15)

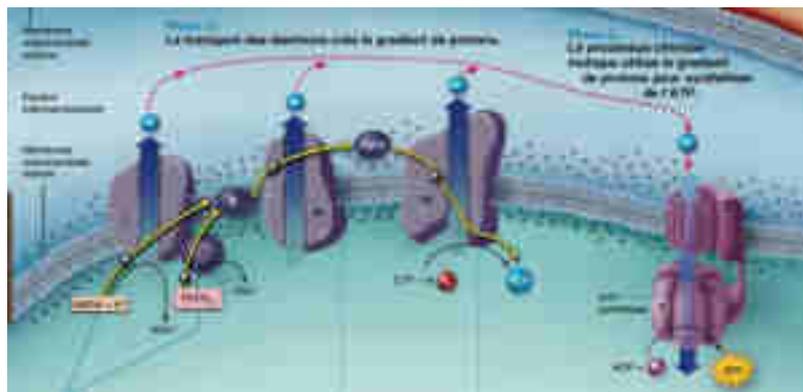


Figure 13 : La phosphorylation oxydative (14)

En résumé un total de 28 ATP sont produits par la phosphorylation oxydative selon la répartition suivante :

- **NADH** (issus de la glycolyse, décarboxylation du pyruvate, et cycle de Krebs) :

- 2 NADH de la glycolyse :  $20/4 = 5$  ATP
- 2 NADH de la décarboxylation du pyruvate :  $20/4 = 5$  ATP
- 6 NADH du cycle de Krebs :  $60/4 = 15$  ATP

Total pour les NADH : **25 ATP**

-**FADH<sub>2</sub>** (issus du cycle de Krebs) :

- 2 FADH<sub>2</sub> du cycle de Krebs :  $12/4 = 3$  ATP

À ces 28 molécules d'ATP issues de la phosphorylation oxydative s'ajoutent les ATP nets produits lors de la glycolyse et du cycle de Krebs, ce qui porte la production totale d'ATP par molécule de glucose en conditions aérobies à **environ 36 à 38 ATP.**

### C. Mécanismes de l'hypertrophie musculaire

L'hypertrophie musculaire est le processus par lequel les muscles augmentent en taille et en volume grâce à l'élargissement des fibres musculaires.

L'hypertrophie musculaire pendant et après une séance d'entraînement n'est pas tout à fait la même chose. (16)

L'hypertrophie transitoire observée pendant une séance d'entraînement souvent appelé "pump" musculaire n'est qu'un effet transitoire et est souvent lié à l'afflux de sang pendant l'exercice et l'accumulation de métabolites tels que l'acide lactique, les ions hydrogène ( $H^+$ ) (en raison de la glycolyse anaérobie), le phosphate inorganique et les produits de la dégradation de l'ATP qui induisent un œdème juste après l'exercice (17).

En ce qui concerne l'hypertrophie post-entraînement communément appelé hypertrophie « durable », elle se produit **pendant la récupération**, grâce à un processus complexe d'adaptation.

Cela survient en réponse à un entraînement de résistance, qui génère principalement de manière isolée ou combinée trois facteurs : une tension mécanique, des lésions musculaires et ou un stress métabolique (15). À la suite de ces facteurs, les fibres musculaires se renforcent et s'adaptent en augmentant de taille.

Il existe principalement deux types d'hypertrophie musculaire post séance :

- Hypertrophie « myofibrillaire »
- Hypertrophie « sarcoplasmique »

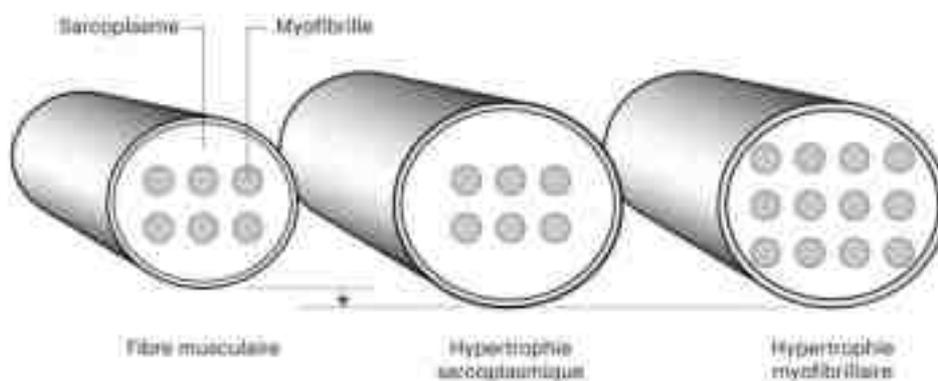


Figure 14 : Hypertrophie myofibrillaire et sarcoplasmique (18)

## **1. L'hypertrophie « myofibrillaire »**

Les facteurs principaux qui interviennent dans ce type d'hypertrophie sont la tension mécanique et les lésions musculaires.

En effectuant un effort qui dépasse un niveau habituel de confort, rencontré dans la vie de tous les jours, les muscles subissent une tension mécanique. Les charges qui sont levées ou poussées pendant les exercices de musculation représentent un stress mécanique qui stimule les muscles à s'adapter. Cette adaptation pour une hypertrophie optimale passe avant tout par un entraînement efficace et la consommation de repas à haute teneur en acide aminés afin d'optimiser la synthèse des protéines.

Dans les deux cas, la synthèse des protéines est favorisée par l'intermédiaire d'une protéine kinase appelée mTOR (mammalian target of rapamycin).

Cette dernière agit comme un régulateur central de la croissance et du métabolisme cellulaire, y compris la croissance musculaire selon différents mécanismes.

L'importance de cette protéine kinase dans l'hypertrophie musculaire provient d'une étude qui a montré que la prise d'un immunosuppresseur (rapamycin) bloquant la mTOR, avant un entraînement de force entraînait aucune augmentation de la synthèse des protéines (Drummond et coll., 2009) (19).

Lorsque l'entraînement est réalisé à jeun, l'activation de mTOR et la synthèse protéique sont sous-optimales, ce qui entraîne un bilan protéique musculaire négatif après l'effort. Ce bilan, défini comme la différence entre la synthèse des protéines et leur dégradation, reflète un déficit en protéines musculaires post-entraînement.

Pour activer efficacement la voie mTOR et optimiser la synthèse protéique, garantissant ainsi un bilan protéique positif dans le muscle, l'ingestion d'acides aminés est aussi indispensable que la stimulation mécanique. Ces derniers jouent un double rôle dans le muscle : ils fournissent les briques nécessaires à la synthèse des protéines et agissent comme des signaux moléculaires pour stimuler mTOR.

Parmi eux, la leucine, un acide aminé à chaîne ramifiée (connu comme étant le plus anabolisant), est particulièrement efficace pour activer mTOR. Cela est dû à la présence d'un récepteur spécifique sur les cellules musculaires qui détecte la leucine : le transporteur LAT-1 (L-type amino acid transporter 1). La leucine en agissant sur le récepteur déclenche une chaîne

de réactions impliquant des protéines de transport appelées protéines Rag, qui connectent mTOR à son activateur, la protéine Rheb (voir Figure 15).

En entrant dans les cellules musculaires, la leucine stimule ces protéines Rag, activant ainsi mTOR. Ce processus favorise la synthèse des protéines, ce qui contribue à augmenter la masse et la force musculaires.

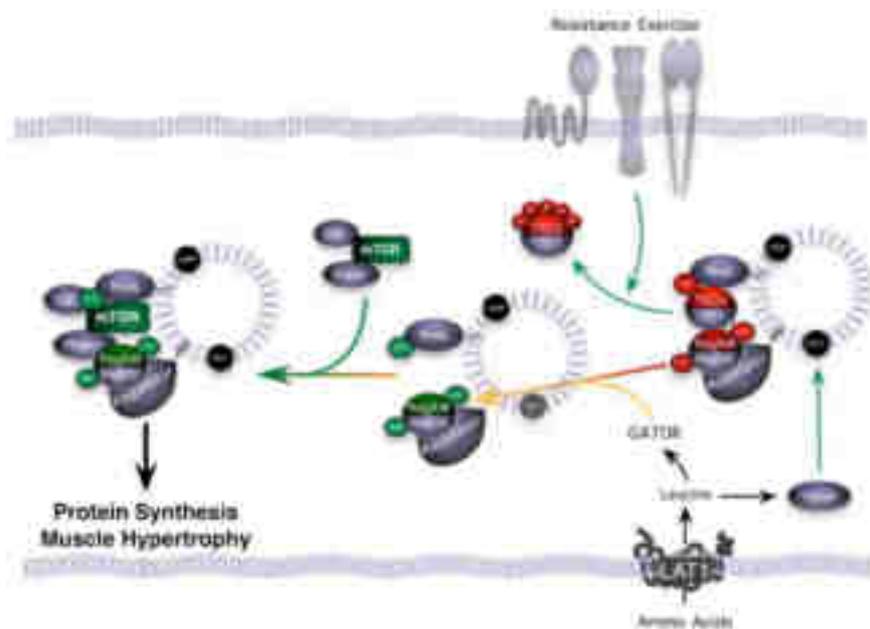


Figure 15: Schéma montrant l'activation de mTOR après un exercice de résistance et sous l'effet des acides aminés (20)

Des études de 2012 ont montré qu'après un entraînement de force, le nombre de transporteurs LAT-1 à la surface des cellules musculaires augmente temporairement, atteignant un pic pendant environ 90 minutes, tandis que la synthèse d'ARNm responsable de la production de ces transporteurs demeure élevée pendant près de 24 heures (21).

Une augmentation rapide du taux de leucine dans le sang permet donc de maximiser l'utilisation des transporteurs LAT-1 présents en plus grand nombre sur les membranes musculaires après l'effort.

Même si l'expression génique de LAT-1 reste élevée sur une période prolongée (jusqu'à 24 heures), le pic d'activité des transporteurs est court. De ce fait manquer cette « fenêtre d'opportunité » directement après la séance pourrait limiter les gains musculaires (20,22)

En ce qui concerne les microlésions, elles surviennent lors d'un entraînement intense, particulièrement avec des séries courtes à charges lourdes (entraînement en force) et activent des processus de réparation induisant une néosynthèse de ces myofibrilles, ce qui augmente la densité et la taille des fibres (23)

Ce processus de réparation est médié par l'activité des cellules satellites, qui résident entre la lame basale et le sarcolemme. Ces « cellules souches myogéniques » sont normalement quiescentes, mais deviennent actives lorsqu'un stimulus mécanique suffisant est imposé aux muscles squelettiques. Une fois excitées, les cellules satellites prolifèrent et finissent par fusionner avec les cellules existantes. D'une part, elles apportent une capacité de synthèse accrues de nouvelles protéines contractiles. D'autre part les cellules satellites coexpriment divers facteurs de régulation myogéniques comme Myf5, MyoD, myogénine et MRF4, qui aident à la régénération et à la croissance musculaires. Ces facteurs régulateurs se lient à la séquence d'éléments d'ADN spécifiques présents dans le promoteur du gène musculaire, chacun jouant un rôle distinct dans la myogenèse (24).

Ainsi cette augmentation du nombre de myofibrilles permet une meilleure capacité contractile du muscle, ce qui conduit à une augmentation de la force. C'est le type d'hypertrophie qui est souvent recherché par les athlètes de force, comme les haltérophiles et les powerlifters.

## **2. L'hypertrophie « sarcoplasmique »**

Ce type d'hypertrophie désigne l'augmentation du volume du sarcoplasme, le fluide qui entoure les myofibrilles.

Les facteurs principaux qui interviennent dans ce type d'hypertrophie sont la tension mécanique (vu précédemment) et le stress métabolique.

Cette hypertrophie sarcoplasmique concerne surtout les entraînements à volume de travail élevé : répétition de séries longues à charges modérées, avec des périodes de récupération plus courte (23). Un tel entraînement repose sur la glycolyse anaérobie pour la production d'ATP, ce qui entraîne l'accumulation ultérieure de métabolites tels que le lactate, l'ion hydrogène, le phosphate inorganique, la créatine et d'autres. (25)

Une des hypothèses pour expliquer l'hypertrophie sarcoplasmique serait que cette accumulation de métabolites stimule l'augmentation de volume du sarcoplasme. De plus, un environnement plus acide peut entraîner une dégradation accrue des fibres et une plus grande stimulation de

l'activité nerveuse sympathique, médiant ainsi une réponse hypertrophique adaptative accrue (26)

L'objectif est donc de maximiser l'accumulation de glycogène et d'autres nutriments dans le muscle, augmentant ainsi le volume du sarcoplasme et donc de la fibre musculaire du muscle entier, sans nécessairement améliorer leur capacité contractile.

### **3. Optimisation de l'Hypertrophie : Volume ou Intensité ?**

L'intensité et le volume de travail sont deux paramètres indépendants.

Le volume d'entraînement peut se quantifier de plusieurs façons différentes et peut correspondre :

- Au nombre de séries effectuées par groupe musculaire sur une séance ou une semaine d'entraînement (exemple : 3 séries de 3 exercices de pectoraux donc 9 séries sur 1 séance)
- Au nombre de répétitions effectuées sur toutes les séries d'une séance ou d'une semaine d'entraînement (exemple : 9 séries avec 10 répétitions par série donc 90 répétitions sur 1 séance)
- À la charge de travail utilisée sur toutes les répétitions de toutes les séries d'une séance ou d'une semaine d'entraînement (exemple : 9 séries avec 10 répétitions par série utilisant une charge de 100 kg donc 9000 kg sur 1 séance)

En ce qui concerne l'intensité de travail, cela correspond au pourcentage de la charge la plus importante qu'une personne est capable de soulever. En d'autres termes, si une personne travaille à 100% d'intensité, elle soulève donc son maximum qui correspond à 1 RM (une répétition max).

Pour optimiser l'hypertrophie musculaire, il est essentiel de déterminer lequel de ces deux paramètres est le plus important. Plusieurs études ont exploré ce sujet pour apporter des réponses :

-Une étude de 2022 a été menée sur 25 hommes non pratiquants afin d'étudier les effets d'un programme d'entraînement en résistance de 8 semaines à des charges faibles (30 % de 1RM) et

élevées (80 % de 1RM) effectué avec et sans échec musculaire sur la force musculaire et l'hypertrophie (27)).

Pour rappel, l'échec musculaire correspond à l'incapacité temporaire d'un muscle à effectuer une répétition supplémentaire avec une technique correcte, en raison d'une fatigue neuromusculaire aiguë survenant au cours de l'exercice.

Chaque membre inférieur a été attribué à l'un des 4 protocoles d'extension unilatérale du genou (un membre inférieur s'entraînait à l'échec et l'autre non) :

- Répétitions jusqu'à l'échec avec une faible charge (~34,4 répétitions) ;
- Répétitions jusqu'à l'échec avec une charge élevée (~12,4 répétitions) ;
- Répétitions non jusqu'à l'échec à faible charge (~19,6 répétitions)
- Répétitions non jusqu'à l'échec avec une charge élevée (~6,7 répétitions)

Toutes les conditions ont été effectuées avec un volume d'entraînement total identique entre elles, réparti en 2 séances par semaine. Pour égaliser le volume d'entraînement, des séries supplémentaires étaient ajoutées pour le membre s'entraînant sans aller jusqu'à l'échec.

La force musculaire (1RM) et la section transversale des quadriceps (ASC) ont été évaluées avant et après l'intervention.

Les résultats sont les suivants :

- Charges lourdes avec échec : 33,8 % (1RM) et 8.1 % (ASC)
- Charges lourdes sans échec : 33,4 % (1RM) et 7.7 % (ASC)
- Charges légères avec échec : 17,7 % (1RM) et 7.8 % (ASC)
- Charges légères sans échec : 15,8 % (1RM) et 2.8 % (ASC)

Les principaux résultats de cette étude montrent qu'à **charge légère**, l'entraînement à l'échec est nécessaire pour obtenir des gains en hypertrophie comparables à ceux obtenus avec une charge élevée. Cependant, l'entraînement à l'échec n'a conféré aucun avantage supplémentaire pour les participants s'entraînant à **charge élevée**, que ce soit pour la force ou pour l'hypertrophie. Enfin, quelle que soit la charge, l'entraînement à l'échec était le plus intense en termes d'efforts perçus.

**→ Cette étude montre donc que pour un même volume d'entraînement, les charges lourdes sont plus bénéfiques pour le gain de forces et d'hypertrophie musculaire.**

-Une étude de 2010 a montré que s'entraîner sans aller à l'échec à haut volume et faible intensité (30 % de la RM) donnait une meilleure stimulation de la synthèse protéique qu'en faible volume mais à haute intensité (90 % de la RM) (28)

**→ Cette étude montre donc que le volume d'entraînement doit être pris en compte dans l'hypertrophie musculaire, même sans atteindre l'échec, à différentes intensités.**

-Un article de janvier 2022 a repris 6 études qui comparent un entraînement à faible intensité mais haut volume et un entraînement à forte intensité mais faible volume (29). Toutes les études ont montré que lorsque les séries étaient poussées jusqu'à l'échec musculaire, l'entraînement à faible intensité produisait les mêmes gains musculaires qu'avec des charges lourdes

**→ Cet article montre que, bien que le volume soit différent, atteindre l'échec musculaire reste primordial pour des gains similaires, que l'entraînement soit de faible ou de forte intensité.**

### III. Les Macronutriments et Micronutriments

#### A. Protéines

Les protéines sont des macromolécules formées par un enchainement d'acides aminés qui sont des **composés carboxyliques** portant également un groupe fonctionnel **amine** et un groupement (chaîne) latéral R(30). Parmi les 500 acides aminés connus, une vingtaine est d'intérêt pour l'organisme c'est-à-dire protéinogènes (voir figure 16). Parmi ces 20 acides aminés, 9 sont dits "essentiels", car le corps ne peut pas les synthétiser et doit les obtenir par l'alimentation. Les autres, appelés "non essentiels", peuvent être produits par l'organisme (31).

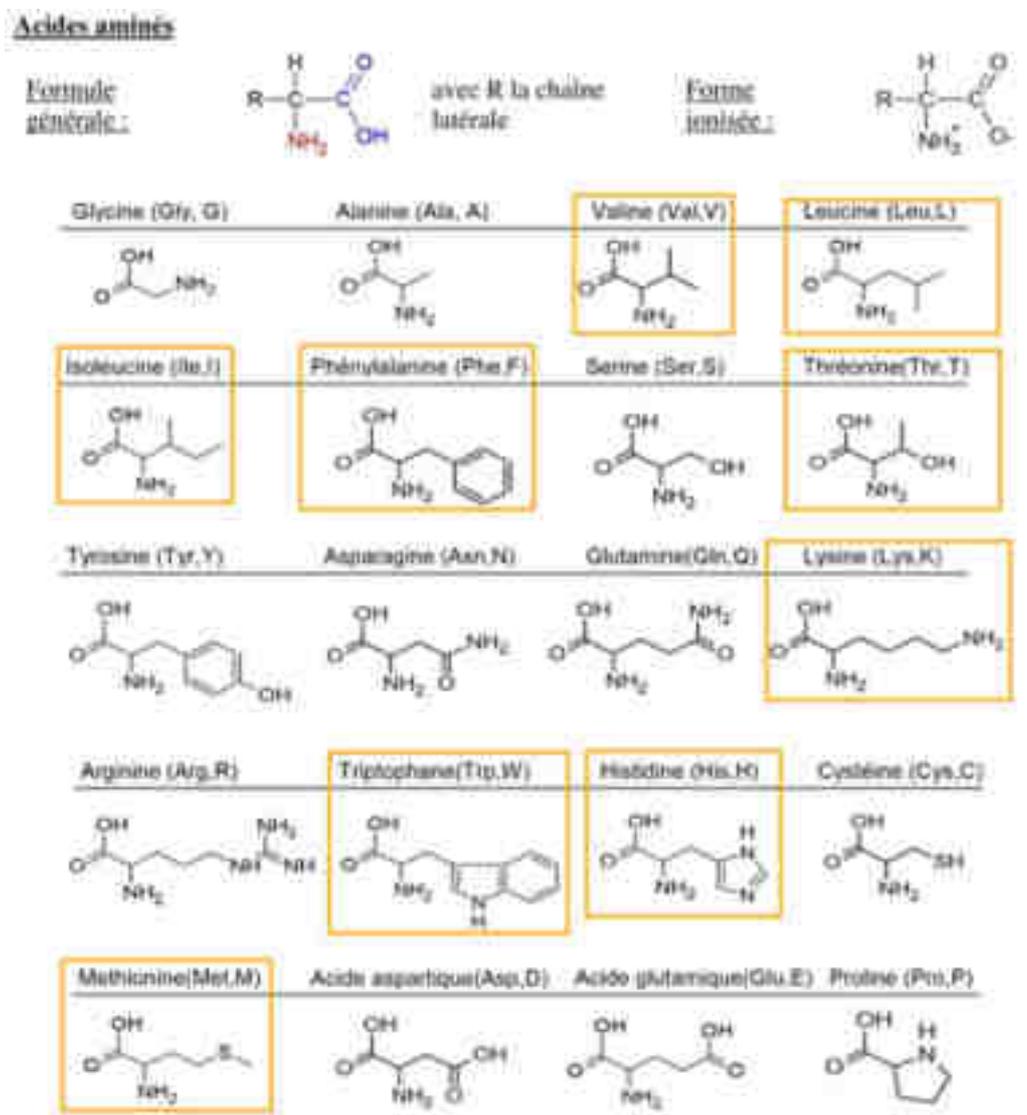


Figure 16 : Tableau des 20 acides aminés dont **9 essentiels** (32)

Les acides aminés s'associent entre eux par des liaisons appelées **liaisons peptidiques**, donnant naissance à différentes structures moléculaires :

- **Peptides** : lorsque la séquence comporte moins de 10 acides aminés.
- **Polypeptides** : lorsque la chaîne contient moins de 100 acides aminés.
- **Protéines** : au-delà de 100 acides aminés. Par exemple, l'hémoglobine en possède plus de 500.

La fonction spécifique d'une protéine dans l'organisme dépend de plusieurs facteurs : la nature et le nombre des acides aminés qui la composent, leur agencement ainsi que la structure spatiale adoptée par la chaîne (33)

Les protéines corporelles subissent un renouvellement continu, avec un équilibre dynamique entre la protéosynthèse et la protéolyse. Chez l'adulte, ce renouvellement représente environ 250-300 g par jour, soit environ 2,5 % de la masse protéique totale. Ces protéines jouent un rôle central dans de nombreuses fonctions physiologiques majeures, telles que le développement et la cicatrisation musculaire, les réactions enzymatiques et hormonales, le transport des nutriments, le fonctionnement du système immunitaire... (31)

Contrairement aux glucides et aux lipides, qui peuvent être stockés sous forme de glycogène ou de graisses corporelles, les protéines ne sont pas directement stockées dans le corps. Lorsqu'on consomme des protéines, elles sont digérées et décomposées en acides aminés, qui sont utilisés pour diverses fonctions cités ci-dessus. Si l'on mange plus de protéines que ce dont le corps a besoin à un moment donné, l'excédent d'acides aminés est soit utilisé pour produire de l'énergie (ex : néoglucogenèse), soit converti en graisses et stocké, soit peut également être éliminé via les reins sous forme d'urée dans les urines.

Ce qui est important à savoir est que la synthèse des protéines nécessite la présence de tous les acides aminés nécessaires à la formation de ces derniers, c'est-à-dire les 20 acides aminés (9 essentiels et 11 non essentiels). Si l'un des 9 acides aminés essentiels est absent, la synthèse des protéines sera partielle, car le corps ne pourra pas effectuer cette synthèse efficacement sans cet acide aminé.

Les acides aminés sont présents dans de nombreux aliments, mais en quantité variable. Il est essentiel de diversifier les sources de protéines, car la répartition des différents acides aminés peut différer d'un aliment à l'autre.

## 1. Sources de protéines

Les protéines peuvent être obtenues à partir de diverses sources, qui se distinguent principalement par leur origine : **animale** ou **végétales** (34)

### d. Protéines d'origine animales

Principalement retrouvées dans le lait, les œufs, la viande ou encore le poisson.

### e. Protéines d'origine végétales

Principalement retrouvées dans les céréales (blé, riz, quinoa...), les légumineuses (haricots secs, pois chiche, lentilles...) et les fruits à coques (amandes, noix...)

La plupart des protéines végétales sont dites "incomplètes" car elles ne contiennent pas tous les acides aminés essentiels en quantité suffisante.

La qualité et l'efficacité des protéines varient énormément et cela dépend de biodisponibilité de ces dernières.

La biodisponibilité des protéines regroupe plusieurs facteurs :

- **Leur profil en acides aminés** :

Plus une protéine contient des acides aminés essentiels et en quantités suffisantes, plus elle est considérée comme une protéine de haute valeur biologique (ex : Viandes, œufs, poissons)

Pour reconnaître et contrôler la qualité de nos protéines, il existe un indicateur intéressant nommé PDCAAS (Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score) (35)

C'est tout simplement une échelle qui permet d'évaluer la qualité en protéines de nos aliments selon la quantité d'acides aminés présentes et de la digestibilité de ces protéines.

Produit	Score AA	Digestibilité
Oeuf	121	97
Lait	106	95
Whey (protéine de lait)	114	100
Protéine de soja	103	95
Poulet	1	94
Boeuf	0,98	94
Isolat de protéine de courge	1	92
Soja	106	86
Protéine de pois concentrée	0,95	94
Protéine de riz	0,95	90
Protéine de graine de tournesol	0,96	89
Pois chiches	0,92	85
Cacahuète	0,55	94
Choucroute complet	0,6	85
Riz	0,57	88
Graines de choucroute raffinée	0,52	94

$$\text{Indice chimique (PDCAAS)} = \text{Digestibilité} \times \text{Score d'acide aminé}$$

Figure 17 : Les valeurs PDCAAS de quelques aliments (35)

Le score d'acide aminé (score AA) est une mesure de la qualité de la protéine basée sur la quantité d'acides aminés essentiels qu'elle contient par rapport aux besoins humains selon la formule suivante :

$$\text{Score d'acide aminé} = 100 \times \frac{\text{Quantité d'acides aminés essentiels dans la protéine}}{\text{Quantité d'acides aminés essentiels dans la protéine de référence}}$$

Un score  $\geq 1$  signifie que la protéine fournit tous les acides aminés essentiels dans les bonnes proportions nécessaires à l'organisme.

Quant à la digestibilité, il s'agit de la proportion de protéines effectivement digérées et absorbées par l'organisme. Elle est exprimée en pourcentage

Ainsi, le score PDCAAS varie généralement entre 0 et 1. Un score de 1 indique que la protéine est de haute qualité, car elle fournit tous les acides aminés essentiels en quantités adéquates et est bien digérée par l'organisme (36)

On peut noter d'ailleurs dans la figure 17 que la plupart des protéines végétales ont un score en acides aminés  $< 1$ . Cela signifie que même si deux aliments contiennent la même quantité de protéines (par exemple, 25 g de protéines pour 100 g de cuisse de poulet et pour 100 g de beurre de cacahuète), le corps n'absorbera qu'une partie de ces protéines, selon leur biodisponibilité

et leur score en acides aminés (le PDCAAS pour le poulet étant de 0,94 contre 0,52 pour les cacahuètes) (34)

Certes les protéines d'origines végétales ne sont pas complètes en acides aminés essentielles mais en faisant les bonnes associations de protéines (ex : Riz +lentille), nous pouvons reconstituer un profil complet en acides aminés.

- **Les anti-nutriments :**

Ce sont des composés naturellement présents dans certains aliments, principalement d'origine végétale (rarement animale), qui peuvent interférer avec l'absorption, la digestion ou l'utilisation des nutriments par l'organisme (37)).

Voici une liste non exhaustive de quelques anti-nutriments :

<b>Anti-nutriments</b>	<b>Sources alimentaires</b>	<b>Mécanisme d'action</b>	<b>Effet sur l'absorption</b>
<b>Phytates</b>	Céréales complètes, légumineuses, noix, graines	Se lient aux minéraux (fer, zinc, calcium, magnésium), réduisant leur absorption.	Réduit la biodisponibilité des minéraux (fer, zinc, calcium, magnésium).
<b>Lectines</b>	Légumineuses, céréales, pommes de terre, tomates	Peuvent perturber l'absorption des nutriments et provoquer des ballonnements et des gaz.	Perturbation de la digestion et inhibition de l'absorption des nutriments.
<b>Oxalates</b>	Épinards, rhubarbe, betterave, cacao, thé	Se lient au calcium pour former du calcium oxalate, réduisant l'absorption du calcium.	Diminue l'absorption du calcium.
<b>Tanins</b>	Thé, café, raisin, pommes, certains légumes	Se lient au fer non hémique, inhibant son absorption.	Inhibition de l'absorption du fer.
<b>Inhibiteurs de protéase</b>	Légumineuses, céréales, soja	Inhibent les enzymes digestives nécessaires à la dégradation des protéines.	Réduit l'efficacité de la digestion des protéines.

Figure 18 : Tableau des Anti-nutriments : Effets sur l'Absorption des Nutriments (38)

- **La structure de la protéine :**

La digestibilité des protéines est influencée par leur structure tridimensionnelle, qui détermine leur dégradation par les enzymes digestives. Les protéines animales, généralement plus simples et moins complexes, sont plus facilement décomposées par ces enzymes, ce qui améliore leur digestibilité. En revanche, les protéines végétales, souvent plus complexes, peuvent être moins digestibles en raison de leur structure et de la présence de facteurs antinutritionnels. (39)

## **2. Apport journalier en protéines**

Les sportifs ont besoin de consommer davantage de protéines que les personnes sédentaires, non seulement pour compenser les pertes liées aux entraînements, mais aussi pour stimuler la synthèse de nouvelles fibres musculaires et favoriser la croissance musculaire.

La quantité de protéines nécessaire dépend du poids du sportif, en particulier de sa masse musculaire et de sa masse grasse, ainsi que de la fréquence de ses entraînements et de ses objectifs.

L'ANSES (Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail) considère que la référence nutritionnelle en protéines des adultes en bonne santé est de **0,83 g/kg/j**.

En raison du manque de données disponibles, il est difficile de déterminer une limite supérieure de sécurité pour l'apport en protéines. Actuellement, d'après les connaissances disponibles, des apports allant de **0,83 à 2,2 g/kg/j** de protéines (soit entre 10 et 27 % de l'apport énergétique total) sont considérés comme adéquats (40)

Un apport excessif en protéines n'est pas avantageux, car l'organisme ne peut pas éliminer l'excédent, ce qui peut entraîner des surcharges rénales et déséquilibrer le pH sanguin.

## **B. Glucides**

Les glucides jouent un rôle essentiel dans le bon fonctionnement de l'organisme, en particulier pour les muscles et le cerveau. Ils représentent la source d'énergie la plus rapidement disponible et participent également à l'anabolisme des protéines. Leur fonction principale est donc énergétique.

Issus de l'alimentation, ils sont dégradés en glucose, qui est ensuite distribué dans le corps. Une partie est immédiatement utilisée par les cellules pour produire de l'énergie, tandis qu'une autre est stockée sous forme de glycogène dans le foie et les muscles, servant ainsi de réserve énergétique. L'excédent peut également être converti en graisses et stocké dans le tissu adipeux.

La gestion des glucides est essentielle : il est important de savoir quand et en quelle quantité les consommer, ainsi que de choisir les types de glucides adaptés en fonction du moment de la journée, du niveau d'activité physique, du mode de vie et des besoins quotidiens.

Pendant longtemps, les glucides étaient classés en "sucres lents" (glucides complexes) et "sucres rapides" (glucides simples), selon leur structure chimique.

- Les "sucres rapides", comme le sucre, le miel ou les fruits, étaient censés provoquer une élévation rapide de la glycémie.
- Les "sucres lents", comme le pain, les pâtes ou les pommes de terre, étaient digérés plus progressivement libérant l'énergie plus progressivement.

Cette classification est aujourd'hui jugée dépassée (41) . En réalité, certains glucides complexes (ex. : pain blanc, purée) ont un IG élevé, alors que certains glucides simples (ex. : fructose) ont un IG bas, car leur absorption est plus lente.

### **1. Index Glycémique (IG)**

L'index glycémique (IG) classe les aliments contenant des glucides selon leur capacité à augmenter la glycémie. L'IG d'un aliment est déterminé en mesurant l'élévation de la glycémie après ingestion de 50 g de glucides digestibles de cet aliment (41)

Sur une échelle de 1 à 100, il mesure la rapidité avec laquelle les glucides d'un aliment se transforment en glucose dans le sang, en prenant comme référence le glucose pur (IG = 100).

Les aliments sont répartis en trois catégories (42) :

- **IG bas** : inférieur à 55
- **IG modéré** : entre 55 et 70
- **IG élevé** : supérieur à 70

L'IG ne dépend pas seulement de l'aliment, mais aussi de plusieurs facteurs :

- **Cuisson** : plus elle est prolongée, plus l'IG augmente (ex. : pâtes bien cuites vs al dente).
- **Texture** : les aliments liquides sont absorbés plus vite que les solides.
- **Composition du repas** : les fibres, protéines et graisses ralentissent l'absorption, réduisant ainsi l'IG.

L'IG ne tient pas compte de la quantité de glucides réellement consommée. Un aliment à IG élevé peut avoir un faible impact s'il est consommé en faible quantité (ex. : une date  $\approx$  5 g de glucides). À l'inverse, un aliment à IG modéré, mais consommé en grande quantité (ex. : 300 g de pâtes  $\approx$  90 g), peut fortement faire monter la glycémie. (43)

Il est donc préférable d'utiliser la charge glycémique, qui prend en compte à la fois l'IG et la quantité de glucides consommée

## 2. Charge Glycémique (CG)

La charge glycémique (CG) est un indicateur plus fiable que l'index glycémique (IG) pour évaluer l'impact d'un aliment sur la glycémie. Contrairement à l'IG, qui classe les aliments uniquement selon la vitesse d'absorption des glucides, la charge glycémique tient compte de la quantité réelle de glucides consommée (44). Elle est calculée ainsi :

$$CG = \frac{IG \times \text{quantité de glucides d'une portion d'aliment (g)}}{100}$$

Les valeurs sont réparties en trois catégories :

- **CG bas** :  $\leq 10$  → Impact glycémique faible
- **CG modérés** : **entre 11 et 19** → Impact glycémique moyen
- **CG élevés** :  $\geq 20$  → Impact glycémique fort

Ainsi, la charge glycémique est un indicateur plus précis que l'index glycémique pour évaluer l'impact d'un aliment sur la glycémie, offrant ainsi une évaluation plus réaliste de l'effet des aliments sur le corps.

## C. Lipides

Les lipides, ou « graisses », font partie des trois macronutriments, avec les protéines et les glucides. Indispensables à l'organisme, ils participent à la structure des membranes cellulaires, à la synthèse hormonale, à l'absorption des vitamines liposolubles (A, D, E, K) et au bon fonctionnement du système nerveux (45). Ils remplissent deux rôles principaux :

- **Stockage de l'énergie** : sous forme de triglycérides dans le tissu adipeux.
- **Rôle structurel** : via les phospholipides des membranes cellulaires.

Principalement présents sous forme de triglycérides, les lipides sont composés d'acides gras, certains essentiels et à apporter par l'alimentation.

Apportant 9 kcal/g, ils sont le macronutriment le plus calorique, et un excès favorise le stockage des graisses.

On distingue trois grandes catégories d'acides gras :

- **Acides gras saturés (AGS)**, qui ne possèdent aucune double liaison ;
- **Acides gras monoinsaturés (AGMI)** qui possèdent une seule double liaison ;
- **Acides gras polyinsaturés (AGPI)** qui possèdent plusieurs doubles liaisons.

### **1. Les Acides gras saturés (AGS)**

Les acides gras saturés (AGS), souvent qualifiés de « mauvais lipides », sont associés à une hausse du cholestérol et à un risque accru de maladies cardiovasculaires. On les trouve surtout dans les graisses animales (beurre, crème, fromages, lard), certaines huiles tropicales (palme) et de nombreux produits transformés (pâtisseries, charcuteries, produits laitiers gras).

Bien que nécessaires en petite quantité, leur consommation est souvent excessive dans l'alimentation moderne, ce qui nuit à la santé cardiovasculaire (46)

### **2. Les acides gras monoinsaturés (AGMI)**

Les acides gras mono-insaturés (AGMI), principalement constitués d'oméga-9 (acide oléique), sont considérés comme neutres pour l'organisme. Bien qu'ils ne soient ni nocifs ni essentiels, le corps est capable de les synthétiser par lui-même. Toutefois, leur consommation en quantité adéquate reste importante, car ils contribuent à l'apport lipidique global nécessaire au bon fonctionnement de l'organisme (notamment comme protecteur du système cardiovasculaire). Les AGMI sont naturellement présents dans plusieurs aliments, notamment les huiles végétales (huile d'olive, huile de colza, huile de noisette), les fruits à coque (amandes, noix de macadamia, noisettes, pistaches), les avocats ...

### **3. Les acides gras polyinsaturés (AGPI)**

Certains acides gras insaturés sont **essentiels**, car indispensables au métabolisme, aux membranes cellulaires et à la synthèse hormonale. Ne pouvant être synthétisés par l'organisme, ils doivent être apportés par l'alimentation.

Les principaux sont :

- **Oméga-6** (acide linoléique, LA), précurseur de l'acide arachidonique à visé pro-inflammatoire
- **Oméga-3** (acide alpha-linolénique, ALA), permettant la synthèse de l'EPA et, en faible quantité, du DHA à visé anti-inflammatoire (46)

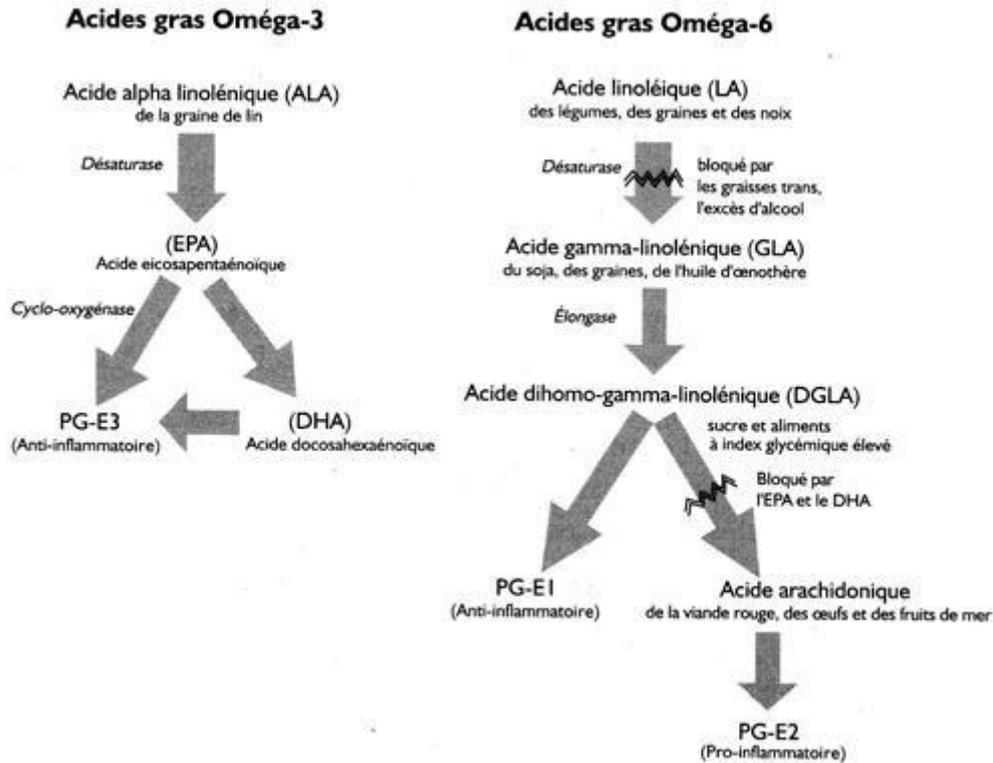


Figure 19 : Le devenir des AGPI oméga-3 et oméga-6 (47)

Les **oméga-3** et **oméga-6** ont des rôles complémentaires mais opposés : les oméga-3 sont **anti-inflammatoires**, tandis qu'un excès d'oméga-6 peut favoriser l'**inflammation**. Un bon équilibre entre les deux est essentiel pour la santé.

L'EPA et le DHA (oméga-3) contribuent ainsi à la **protection cardiovasculaire** en réduisant les molécules pro-inflammatoires et le risque d'athérosclérose (48)

#### 4. Apport journalier et complémentation en lipides

Comme vu précédemment, un tel déséquilibre entre oméga-3 et oméga-6 pourrait augmenter le risque d'obésité, de diabète, de maladies cardiovasculaires, de cancers et de pathologies inflammatoires.

C'est pourquoi, l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) et l'ANSES recommandent un apport lipidique de **35 à 40 % de l'AET**, dont **4 % en acide linoléique (oméga-6)** et **1 % en ALA (oméga-3)**, avec un **rapport oméga-6/oméga-3 < 5**.

Pour les oméga-3 à longue chaîne (DHA et EPA, présents dans les poissons gras), les apports conseillés sont de **250 mg/j de DHA** et **500 mg/j de DHA + EPA**(49)(45)

## **D. Micronutriments**

Contrairement aux macronutriments, les micronutriments n'apportent aucune énergie lorsqu'ils sont consommés. Ce sont des éléments que l'organisme ne sait pas synthétiser, à quelques exceptions près (ex : la vitamine D, B3 et K), et qui doivent donc être apportés par l'alimentation. (50)

Bien que nécessaires en très petites quantités, ils jouent un rôle fondamental dans de nombreux processus physiologiques et sont essentiels au maintien d'une bonne santé.

Les micronutriments se répartissent en quatre grandes catégories :

- Les vitamines
- Les minéraux et oligo-éléments
- Les acides gras essentiels
- Les acides aminés essentiels

Certains groupes de population, comme les femmes enceintes, les personnes âgées ou les sportifs, ont des besoins accrus en micronutriments. Si ces apports ne sont pas suffisants, cela peut entraîner un affaiblissement des défenses immunitaires, des carences, une baisse des performances physiques ou une diminution du bien-être général.

Chez les sportifs, la demande en micronutriments est souvent plus élevée en raison d'une dépense énergétique et d'un métabolisme accru, sans oublier un stress physique important. Même une légère carence peut avoir un impact sur les performances et augmenter le risque de blessures. Il est donc crucial pour les athlètes de s'assurer qu'ils reçoivent des apports suffisants en vitamines et minéraux, que ce soit par une alimentation variée et équilibrée (difficile de nos jours au vu de la qualité des aliments), ou, si nécessaire, par une supplémentation adaptée.

### **1. Les vitamines**

Les vitamines jouent un rôle crucial dans le bon fonctionnement de notre organisme, principalement en tant que coenzymes ou cofacteurs dans les réactions biochimiques essentielles à notre métabolisme. Sans ces nutriments, de nombreuses réactions chimiques vitales, telles que l'assimilation des macronutriments, seraient altérées, ce qui compromettrait les fonctions physiologiques.

Les vitamines forment un groupe distinct d'éléments organiques, dont l'ANSES dénombre 13 variétés (51).

Elles se divisent en deux catégories principales, selon leur solubilité :

- **Vitamines liposolubles** : Ces vitamines se dissolvent dans les graisses et sont absorbées en même temps que celles-ci. Lorsqu'elles sont présentes en excès, elles peuvent être stockées dans les tissus graisseux et le foie et présenter des risques de toxicité. On y trouve les vitamines A, D, E et K.
- **Vitamines hydrosolubles** : Ces vitamines se dissolvent dans l'eau, et bien qu'elles puissent être stockées, leur élimination par les urines réduit le risque de toxicité, même en cas de consommation élevée. Les vitamines B (B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9, B12) et la vitamine C font partie de cette catégorie.

LES 13 VITAMINES				
Abbréviation	Rôle	Source	Carence	
<b>A</b>	<b>Rétinol</b>	Vitole, hépatisme, carottes, production des yeux, anti-infectif	Œufs, produits laitiers, fruits et légumes de couleur jaune, orange et vert foncé, foie	Blanc de la vision nocturne, conjonctivite, sécheresse, sensibilité aux infections
<b>B1</b>	<b>Thiamine</b>	Métabolisme, fonctionnement du système nerveux	Blanc (pain), céréales, œufs, légumineuses, céréales complètes, pois, grains, germe de blé	Sécheresse (insuffisance cardiaque et troubles neurologiques)
<b>B2</b>	<b>Riboflavine</b>	Métabolisme, régulation de l'axe immunitaire	Produits laitiers, œufs, légumes, céréales, céréales complètes, légumineuses, noix et grains	Rétarde de croissance, dermatose
<b>B3</b>	<b>Nicotinamide, vitamines PP</b>	Métabolisme, fonctionnement du système nerveux, synthèse des hormones, transport de l'oxygène dans le sang	Viande (volaille, bœuf), poissons, légumineuses, noix et grains	Pellagre, troubles mentaux tels que maux de tête, fatigue, dépression, anémie
<b>B5</b>	<b>Acide panthotémique</b>	Métabolisme, régulation de la croissance et de la glycémie	Blancs, poissons, œufs, céréales complètes, légumineuses, champignons	Fatigue et dépression, troubles digestifs dans les intestins
<b>B6</b>	<b>Pyridoxine</b>	Métabolisme, synthèse des globules rouges, immunité, régulation de la glycémie	Céréales enrichies, légumineuses, fruits et légumes, viande	Démence, anémie, irritabilité
<b>B8</b>	<b>Biotine</b>	Métabolisme	Blancs (œufs), légumes (pois), légumineuses, œufs, céréales complètes	Problèmes neurologiques, perte de cheveux
<b>B9</b>	<b>Acide folique, folate</b>	Synthèse d'ADN et d'ARN, formation des globules rouges	Légumes verts, légumineuses, foie, céréales enrichies	Anémie, perte d'appétit, irritabilité, troubles de la fertilité
<b>B12</b>	<b>Cobalamine</b>	Synthèse d'ADN et d'ARN, formation des globules rouges, système nerveux	Poissons, viande, produits laitiers, œufs, aliments de soja enrichis	Anémie, fatigue, faiblesse
<b>C</b>	<b>Acide ascorbique</b>	Antioxydant, synthèse de collagène, absorption du fer, immunité	Fruits et légumes (notamment orange, kiwi, brocoli, tomate, concombre)	Sécheresse, fatigue, troubles digestifs, douleurs aux articulations
<b>D</b>	<b>Calcérol</b>	Absorption du calcium, métabolisme des os, croissance	Poissons gras (saumon, maquereau), produits laitiers enrichis	Os fragiles, affaiblissement des muscles et des os, ostéoporose
<b>E</b>	<b>Tocophérol</b>	Antioxydant, protection des tissus	Huiles végétales, noix et graines, légumes verts et orange	Fragilité des globules rouges, troubles du développement osseux (enfant)
<b>K</b>	<b>Phylloquinone, ménoquinone</b>	Coagulation du sang, formation des os	Légumes verts, huiles végétales, foie, viande	Hémorragie (nouveau-né)

Figure 20 : Les 13 Vitamines : Fonctions, sources et conséquences des carences (52)

Bien que toutes les vitamines jouent un rôle essentiel dans la santé et la performance des sportifs, celles qui sont les plus couramment utilisées et qui méritent une attention particulière sont la vitamine D et la vitamine C

#### a. La vitamine D

La vitamine D, une vitamine liposoluble, joue un rôle crucial dans le maintien de l'équilibre du calcium et du phosphore dans l'organisme, ainsi que dans la minéralisation des os, du cartilage et des dents, tant pendant qu'après la croissance.

La vitamine D provient de deux sources : la synthèse cutanée et l'alimentation

Dans la peau, la pro-vitamine D3 est produite à partir du 7-déhydrocholestérol dans les couches profondes de l'épiderme sous l'effet des rayons UVB (290-315 nm).

L'alimentation fournit de la vitamine D2 (ergocalciférol d'origine végétale) et de la vitamine D3 (cholécalfiérol d'origine animale).

Une méta-analyse de 2011 a étudié l'impact de la supplémentation en vitamine D sur la force musculaire chez 5072 adultes (57)

Les résultats montrent que la vitamine D n'améliore pas la force musculaire globale chez les individus avec des niveaux suffisants de vitamine D sérique (>25 nmol/L). Cependant, chez les personnes déficientes en vitamine D, une amélioration significative de la force musculaire proximale (surtout au niveau des membres inférieurs) a été observée, avec un gain important mesuré par des tests fonctionnels (SMD = 3,52).

Cela suggère que la vitamine D est bénéfique pour la fonction musculaire uniquement en cas de déficit avéré.

Les références nutritionnelles pour la vitamine D, exprimées en microgrammes par jour ( $\mu\text{g}/\text{j}$ ), varient selon l'âge et l'état physiologique. Voici les recommandations de l'ANSES :

Groupes de population	AS	LSS
Nourissons de moins de 6 mois	10	25
Nourissons de 6 mois et plus	10	25
Enfants de 1 à 3 ans	15	50
Enfants de 4 à 10 ans	15	60
Adolescents de 11 à 17 ans	15	100
Hommes et femmes de 18 ans et plus	15	100
Femmes enceintes ou allaitantes	15	100

AS : Apport Satisfaisant

LSS : Limite supérieur de sécurité

Figure 21 : Recommandations de l'ANSES pour la vitamine D (51)

### b. La vitamine C

La vitamine C, ou acide ascorbique, joue un rôle fondamental dans de nombreux processus biologiques. Elle contribue au renforcement des fibres de collagène, qui forment le tissu conjonctif et assurent la cohésion et la structure des différents tissus de l'organisme. Elle est également impliquée dans la synthèse de molécules essentielles à la transmission nerveuse, comme la noradrénaline. Grâce à ses propriétés antioxydantes, elle protège les cellules contre le stress oxydatif en neutralisant les radicaux libres. Enfin, elle améliore l'absorption du fer non hémérique, présent dans les aliments d'origine végétale comme les légumineuses et les noix, contribuant ainsi à la prévention des carences en fer (54)

La vitamine C existe sous plusieurs formes, qui diffèrent en termes de biodisponibilité et de tolérance digestive :

- **Acide L-ascorbique** : Forme la plus courante de vitamine C, l'acide L-ascorbique est hydrosoluble et présente une absorption modérée. Cependant, à forte dose, elle peut être irritante pour l'estomac (55)
- **Ascorbates (calcium, sodium, magnésium, potassium)** : Ces formes tamponnées de vitamine C sont moins acides, ce qui les rend mieux tolérées par le système digestif tout en offrant une biodisponibilité similaire à l'acide ascorbique pur.
- **Vitamine C liposomale** : Grâce à son encapsulation dans des liposomes, cette forme bénéficie d'une absorption améliorée et d'une meilleure rétention cellulaire, tout en

étant moins irritante pour l'intestin. Toutefois, son coût est plus élevé que celui des autres formes (59)

- **Ester-C®** : Composée de métabolites tels que le thréonate de calcium, cette forme brevetée favorise une meilleure absorption et une tolérance digestive accrue (56)
- **Vitamine C naturelle** (Acérola, Camu Camu, Baobab, etc.) : Issue de sources végétales, cette vitamine C est associée à des bioflavonoïdes qui optimisent son absorption. Bien que plus naturelle, elle est généralement moins concentrée que les formes synthétiques (56)

En France, l'Anses recommande un apport quotidien de **110 mg de vitamine C** pour les adultes, avec des besoins accrus pour certaines populations, notamment les fumeurs, en raison d'un stress oxydatif plus élevé (54)

Étant hydrosoluble, la vitamine C n'est pas stockée par l'organisme et doit donc être consommée quotidiennement à travers l'alimentation. On la trouve principalement dans les fruits (cassis, agrumes) et les légumes (persil, poivron). Les excès sont généralement éliminés par les urines, mais une consommation excessive peut provoquer des troubles gastro-intestinaux (Un apport excessif de plus de 3 grammes par jour provoque rapidement des **diarrhées**, des **ballonnements**, des **brûlures d'estomac** et des **nausées**) (57)

## 2. **Les minéraux et oligo-éléments**

Les minéraux et oligo-éléments sont des composés inorganiques. La distinction entre eux repose principalement sur leur concentration dans l'organisme : les oligo-éléments sont présents en très faibles quantités voire pour certains à l'état de traces, tandis que les minéraux se retrouvent en proportions plus élevées.

Ils représentent des nutriments essentiels au bon fonctionnement de l'organisme et jouent un rôle clé dans de nombreuses réactions physiologiques. Indispensables à la contraction musculaire, à l'équilibre hydrique, à la transmission nerveuse et à la production d'énergie, ils revêtent une importance particulière chez le sportif, dont les besoins peuvent être accrus en raison de l'intensité de l'effort physique et des pertes liées à la transpiration. Dans cette section, nous examinerons l'importance de certains minéraux et oligo-éléments, en particulier dans le cadre de la musculation

### a. Le magnésium

Le magnésium est le quatrième minéral le plus abondant dans le corps humain. Chez l'adulte, le corps humain contient environ 25 g de magnésium, dont environ 50 à 60 % sont stockés dans les os et 25 % dans les muscles. Le magnésium extracellulaire ne constitue quant à lui que 1 % du magnésium total dans le corps.

C'est un minéral essentiel impliqué dans plus de 300 réactions enzymatiques dans le corps. Il joue un rôle crucial dans la fonction nerveuse et musculaire, le rythme cardiaque, la régulation de la pression artérielle, le système immunitaire, l'intégrité osseuse et la régulation de la glycémie. Pour les athlètes, le magnésium présente de nombreux bienfaits. Il est particulièrement important pour la contraction et la relaxation musculaires ainsi que pour la transmission de l'influx nerveux, ce qui aide à prévenir les crampes et spasmes musculaire. Le magnésium participe également à la production d'ATP, la principale source d'énergie pour les muscles pendant l'exercice, contribuant ainsi à l'endurance et à la récupération mais aussi à la réduction de la fatigue et l'épuisement.

En outre, il joue un rôle clé dans la densité minérale osseuse, réduisant le risque de fractures, ce qui est particulièrement pertinent pour les sportifs qui soumettent leur corps à des charges physiques intenses. De plus, le magnésium aide à réguler les niveaux de glucose sanguin, jouant un rôle dans le métabolisme des glucides.

Les athlètes ont des besoins accrus en magnésium en raison de la perte de ce minéral par la sueur et l'urine. Il est donc recommandé qu'ils veillent à maintenir un apport suffisant en magnésium, notamment par une alimentation équilibrée ou, si nécessaire, une supplémentation (58)

Les principales sources alimentaires de magnésium sont les oléagineux, le chocolat, le café, les céréales complètes ainsi que les mollusques et crustacés et certaines eaux minérales.

Une carence en magnésium peut se manifester par divers symptômes, notamment (59):

- Fatigue et faiblesse musculaire : Un manque de magnésium affecte la production d'énergie, entraînant fatigue et faiblesse.
- Crampes et douleurs musculaires : Des crampes et douleurs, surtout nocturnes, liées à la gestion musculaire perturbée.
- Troubles du sommeil : Difficultés à s'endormir ou réveils fréquents.

- Anxiété et irritabilité : Un manque de magnésium peut affecter l'équilibre émotionnel.
- Tensions et spasmes musculaires : Tensions et tremblements musculaires, comme les paupières qui tressaillent.

Le magnésium se trouve généralement sous forme de "sels" de magnésium, ce qui signifie qu'il est combiné avec un autre minéral, comme le chlorure, ou avec un composé organique, tel que le citrate (64)

On classe habituellement les sels de magnésium en différentes catégories :

- Les sels inorganiques insolubles (tels que l'oxyde, le carbonate, et l'hydroxyde),
- Les sels inorganiques solubles (comme le chlorure et le sulfate),
- Les sels organiques solubles (comme le citrate, le lactate, et le gluconate),
- Les complexes organiques solubles (tels que le glycinate et le bisglycinate).

Forme	Teneur en magnésium élémentaire	Biodisponibilité
Citrate de magnésium	18,2 %	Très élevée
Bisglycinate de magnésium	16 %	Très élevée
Aspartate de magnésium	23 %	Très élevée
Chlorure de magnésium	12 %	Élevée
Gluconate de magnésium	5,4 %	Élevée
Glycérophosphate de magnésium	11,4 %	Élevée
Lactate de magnésium	12 %	Très élevée
Péonate de magnésium	8,7 %	Élevée
Carbonate de magnésium	40 %	Faible
Hydroxyde de magnésium	41,3 %	Faible
Oxyde de magnésium	60,1 %	Faible

Figure 22 : Comparaison des différentes formes de magnésium : teneur en magnésium et biodisponibilité (60)

Le citrate de magnésium offre une biodisponibilité élevée, surpassant les formes chélatées et l'oxyde de magnésium, grâce à l'acide citrique qui améliore son absorption. Le bisglycinate, une forme chélatée, a une bonne biodisponibilité et est bien toléré. L'oxyde de magnésium, bien que peu coûteux et riche en magnésium élémentaire, a une biodisponibilité très faible, nécessitant des doses fractionnées et pouvant entraîner des effets laxatifs. Le même problème s'applique aux sels inorganiques insolubles.

#### b. Le zinc

Le zinc est le deuxième oligo-élément le plus abondant dans le corps humain. C'est un constituant majeur de chaque cellule et est impliqué dans de nombreuses fonctions biologiques : il intervient dans l'activité de près de 300 enzymes et celle de plus de 2500 facteurs de transcription.

Le corps humain ne peut pas fabriquer de zinc par lui-même ni le stocker, par conséquent, un apport quotidien en zinc est nécessaire pour maintenir un état stable.

Le zinc est essentiel à de nombreux processus biologiques et joue un rôle clé dans divers domaines importants, notamment en ce qui concerne les sportifs :

- Dans le métabolisme des nutriments : il intervient dans le métabolisme des glucides, des lipides et des protéines, et contribue à la régulation de l'insuline (61)
- Sur le taux de testostérone sérique: Le zinc est essentiel à la fertilité masculine, car il soutient la production de testostérone et protège contre le stress oxydatif. Une carence peut nuire à la spermatogenèse et au bon fonctionnement hormonal (62).

Une revue systématique de 38 études, dont 8 études cliniques et 30 études animales, a conclu que la carence en zinc réduit les niveaux de testostérone, tandis que la supplémentation en zinc les améliore. L'effet de la supplémentation varie en fonction des niveaux de base de zinc et de testostérone, de la forme de zinc utilisée, de la dose et de la durée de la supplémentation. (63)

Cette augmentation des taux de testostérone est d'autant plus pertinente dans un contexte d'activité physique, en particulier chez les sportifs. En effet, des taux

hormonaux optimaux sont associés à une meilleure synthèse protéique, une augmentation de la masse et de la force musculaire, une récupération plus efficace ainsi qu'à une meilleure adaptation à l'entraînement, notamment en musculation et dans les sports de puissance. (64–66)

Les principales sources alimentaires de zinc incluent la viande, les abats, le fromage, les légumineuses, ainsi que les poissons et fruits de mer. Cependant, la biodisponibilité du zinc est influencée par plusieurs facteurs alimentaires, tels que les phytates présents dans les céréales et les légumineuses, qui peuvent réduire son absorption. (67)

## **IV. Les Compléments Alimentaires les Plus Utilisés en Musculation**

### **A. Protéine du lactosérum (Whey Protéine)**

La Whey protéine, ou protéine de lactosérum en français, est une protéine dérivée du lait. Le lait se compose de deux types principaux de protéines : la caséine, qui constitue environ 80 % de ses protéines totales, et le lactosérum, qui en représente environ 20 % (68).

La protéine de lactosérum (whey protéine) est un complément alimentaire largement utilisé dans les industries alimentaires et pharmaceutiques en raison de sa haute valeur nutritionnelle. Elle est particulièrement riche en éléments de qualité, comme la  $\beta$ -lactoglobuline, l' $\alpha$ -lactalbumine, les immunoglobulines et la lactoferrine, et contient également du lactose, des minéraux, des vitamines et des lipides. De plus, la whey fournit les neuf acides aminés essentiels (leucine, isoleucine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane, valine, et histidine) que le corps humain ne peut pas synthétiser lui-même. Ces acides aminés sont cruciaux pour la réparation et la croissance musculaire, faisant de la whey un choix privilégié parmi les compléments nutritionnels.

En fonction de la technique d'extraction utilisée, nous obtenons de la whey sous de nombreuses formes (concentrée, isolat, hydrolysate ou native).

Les protéines de lactosérum retrouvées dans la whey concentrée, isolat et hydrolysate constituent en réalité la partie liquide du lait lors de la fabrication du fromage, lorsque le lait coagule pour former du caillé (utilisé pour le fromage) et du lactosérum. C'est le même liquide que nous retrouvons sur nos yaourts quand ils ont passé quelques jours au réfrigérateur.

Ces différents types de whey protéines se distinguent donc par des méthodes de fabrication différentes qui affectent la qualité, la composition, et la structure des protéines (69–71)

<u>Les types de Whey</u>	<u>Processus de Fabrication</u>	<u>Teneur en Protéines</u>	<u>Avantages</u>	<u>Inconvénients</u>
<b>Whey Native</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasteurisation à basse température (~70°C) pour préserver la structure des protéines.</li> <li>- Filtration mécanique (microfiltration, ultrafiltration) à froid pour séparer les protéines.</li> <li>- Séchage par pulvérisation à basse température.</li> </ul>	80-90%	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Préserve les propriétés bioactives des protéines (immunoglobulines, lactoferrine, leucine).</li> <li>- Naturellement plus riche en leucine</li> <li>-Faible teneur en lactose</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coûteuse.</li> <li>-Processus de fabrication complexe : absence de transformation fromagère →gout moins riche</li> <li>-Moins courante sur le marché</li> <li>-Moins de variété de saveur disponible sur le marché</li> </ul>
<b>Whey Concentrée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasteurisation à basse température (~70°C) pour préserver la structure des protéines.</li> <li>-Fabriquée à partir du lactosérum fromager par ultrafiltration majoritairement</li> <li>- Soumise à des traitements thermiques et chimiques lors de la fabrication du fromage.</li> </ul>	70-80%	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le plus utilisé, le plus facile à produire et le moins chère de tous (30-40 € /kg)</li> <li>- Contient des nutriments supplémentaires (graisses, lactose) → meilleure saveur que les autres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Teneur plus élevée en lactose (moins adaptée pour les intolérants) et en graisses → Absorption plus lentes que les autres formes (≈ 2 à 3h)</li> <li>-Protéines de lactosérum dénaturés en raison du caillage (acide /présure)→moins de fractions bioactives</li> </ul>
<b>Whey Isolat</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Pasteurisation à basse température (~70°C) pour préserver la structure des protéines.</li> <li>- Fabriquée à partir du lactosérum par microfiltration avancée, ultrafiltration ou échange d'ions.</li> <li>- Soumise à des traitements thermiques et chimiques lors de la fabrication du fromage.</li> <li>- Séchage par pulvérisation à basse température</li> </ul>	90% et plus	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très pure, haute teneur en protéines.</li> <li>- Faible teneur en lactose (bien tolérée par les intolérants) et en lipide.</li> <li>-Absorption plus rapides que la concentré (≈ 1 à 2h)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Coûteuse. (40-60 € /kg)</li> <li>-Moins de nutriments supplémentaires (lactose et graisse) → saveur un peu plus difficile à apprécier</li> <li>-Protéines de lactosérum dénaturés en raison du caillage (acide /présure)→moins de fractions bioactives</li> </ul>
<b>Whey Hydrolysée</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Protéines de whey concentrée ou isolat dont les protéines sont prédigérées par des enzymes en peptides plus courts pour une digestion plus facile et une absorption rapide</li> </ul>	70-90%	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Absorption extrêmement rapide (≈ 30 min à 1h)</li> <li>- Moins susceptible de provoquer des troubles digestifs.</li> <li>-Hypoallergénique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Goût souvent plus amer.</li> <li>-Très coûteuse. (40-65€ /kg)</li> <li>-Moins de fractions bioactives présentes en raison de l'hydrolyse (T°C et pH)</li> </ul>

**Figure 23** : Tableau comparatif des différents types de protéines de lactosérum

La dénaturation des protéines modifie leur structure tridimensionnelle, ce qui peut altérer leurs fonctions biologiques et propriétés fonctionnelles, comme la solubilité et la capacité à interagir avec d'autres molécules. Bien que cela puisse entraîner une perte de certaines propriétés bioactives, comme les effets immunologiques ou antioxydants, les acides aminés restent généralement intacts et disponibles pour l'absorption. En revanche, la dénaturation peut

améliorer la digestibilité en rendant les protéines plus accessibles aux enzymes digestives. En somme, bien que la dénaturation puisse affecter certaines propriétés des protéines, elle n'influence pas significativement leur valeur nutritive globale.

Les recherches montrent que les différences entre la whey native, qui provient directement du lait, et la whey ordinaire, qui a suivi le processus de fabrication du fromage, ne sont pas assez significatives pour justifier le coût plus élevé de la whey native en termes de croissance musculaire ou de performance. Bien que la whey native puisse offrir des avantages en qualité de protéine et digestibilité, les preuves scientifiques ne confirment pas des bénéfices notables pour la croissance musculaire ou la récupération par rapport à la whey ordinaire (voir étude ci-dessous). Les avantages souvent rapportés sont plus liés à la qualité perçue et au marketing qu'à des différences cliniquement significatives.

### **1. Sécurité et Efficacité :**

Nous avons vu auparavant que la synthèse des protéines dépend à la fois de l'exercice (tension mécanique, métabolique et ou lésions musculaires) mais aussi de l'apport en acide aminés.

Le corps répare ces lésions en synthétisant de nouvelles protéines musculaires, principalement des protéines d'actine et de myosine qui composent les myofibrilles (les structures contractiles des muscles), ce qui permet au muscle de devenir plus gros et plus fort : c'est le processus d'hypertrophie musculaire.

Un apport en protéines est donc primordial pour la synthèse de ces nouvelles protéines musculaires mais il contribue aussi à réduire le temps de récupération et limite la dégradation excessive des fibres musculaires (72).

Se supplémenter en whey est intéressant sur plusieurs points :

-Haute teneur en protéines avec peu de glucides et de lipides : idéale pour compléter les besoins quotidiens en protéines non couverts par l'alimentation dû à un manque de temps et ou d'argent,

-Pratique à consommer : elle se prépare facilement en shaker,

-Absorption rapide par l'organisme, ce qui en fait un complément post-entraînement idéal pour restaurer les réserves de protéines et favoriser la récupération musculaire.

En d'autres termes les protéines soutiennent la croissance musculaire, accélère la récupération, aide à prévenir la dégradation musculaire et améliore les performances globales comme le montre une méta-analyse de 2018. Cette étude avait pour but de déterminer l'effet de la supplémentation en protéines sur les gains de masse musculaire et de force induits par l'entraînement en résistance chez les adultes en bonne santé.

Les données de 49 études portant sur 1863 participants ont montré que la supplémentation en protéines alimentaires augmentait de manière significative ( $p < 0,05$ ) les changements dans la force pour une répétition max, la masse maigre et la taille de la surface transversale des fibres musculaires pendant les périodes d'entraînement par exercice de résistance (73)

On a souvent lu et entendu que la leucine qui est un acide aminé essentiel est reconnu pour son rôle clé dans la synthèse des protéines musculaires (acide aminé sans doute le plus anabolisant).

Une étude de 2017 à comparer les effets de la protéine de lactosérum native enrichie en leucine avec ceux de la protéine de lactosérum classique sur les réponses anaboliques musculaires après un exercice de résistance. (74)

Il s'agissait d'un essai clinique randomisé contrôlé. 24 hommes et femmes jeunes et en bonne santé ont été répartis aléatoirement en deux groupes :

-Groupe **1** : Protéine de lactosérum native enrichie en leucine, fournissant environ 5 g de leucine par dose.

- Groupe **2** : Protéine de lactosérum ordinaire (WPC-80), fournissant environ 2,5 g de leucine par dose.

Les participants ont suivi un programme d'entraînement de résistance standardisé, trois fois par semaine pendant 12 semaines avec consommation d'une dose de 20 g protéine immédiatement après l'entraînement et 2 heures après une séance d'exercice de résistance du bas du corps à forte charge.

Les résultats étaient les suivants : les taux de synthèse des protéines musculaires ont augmenté de 1 à 3 heures après l'exercice avec le WPC-80 (0,119 %) et de 1 à 5 heures après l'exercice avec le lactosérum natif (0,112 %)

Malgré des cohortes extrêmement faibles, les conclusions de cette étude ont été que la whey classique (WPC-80) stimule une réponse rapide mais plus courte, si le paramètre considéré est

la synthèse des protéines musculaires, tandis que le lactosérum natif a montré un effet un peu moins marqué mais qui a duré plus longtemps après l'exercice.

L'étude conclut que la protéine de lactosérum native enrichie en leucine n'offre pas d'avantage supplémentaire par rapport à la protéine de lactosérum classique en termes de réponse anabolique musculaire après un entraînement de résistance. Les résultats indiquent que les deux types de protéines ont des effets similaires sur la synthèse et la dégradation des protéines musculaires. Ainsi, la supplémentation en leucine ne semble pas nécessaire pour améliorer la croissance musculaire, et la protéine de lactosérum native enrichie en leucine n'est pas plus efficace que la protéine de lactosérum ordinaire pour la croissance musculaire ou la récupération.

Une autre étude de 2014 a évalué si l'ajout de leucine à une boisson contenant une faible dose de protéines pouvait stimuler la MPS (synthèse protéiques) de manière équivalente à une dose plus élevée de protéines complètes (75)

Cette étude randomisée en double aveugle a regroupé 40 hommes jeunes (âge moyen :  $21 \pm 1$  an) répartis de la sorte :

1. 25 g de protéines de whey (3,0 g de leucine)
2. 6,25 g de protéines de whey (0,75 g de leucine)
3. 6,25 g de protéines de whey + leucine pour atteindre 3,0 g de leucine totale
4. 6,25 g de protéines de whey + leucine pour atteindre 5,0 g de leucine totale
5. 6,25 g de protéines de whey + mélange de BCAA pour atteindre 5,0 g de leucine totale

Les participants ont consommé leur boisson respective après un exercice de résistance (leg press et leg extension à ~70-80% du 1-RM jusqu'à l'échec musculaire) et différentes techniques de mesure ont été utilisées (mesure du Fractional Synthetic Rate, biopsie avant et jusqu'à 4 h après l'entraînement)

Cette étude a montré que l'ajout de leucine à une faible dose de protéines (6,25 g) a augmenté la synthèse des protéines musculaires (MPS) de manière significative par rapport à la faible dose de protéine seule.

Un autre élément intéressant est que la MPS après ingestion de 6,25 g de protéines avec 5,0 g de leucine était comparable à celle observée après ingestion de 25 g de protéines de whey. Toutefois, l'étude a également mis en évidence que l'augmentation de la MPS n'était pas proportionnelle à l'augmentation de la quantité de leucine au-delà de 3,0 g. Cette absence d'effet

dose-dépendant au-delà de ce seuil suggère l'existence d'un plateau d'activation de la voie mTOR, au-delà duquel un supplément supplémentaire de leucine n'apporte plus de bénéfice anabolique.

Cette absence de différence peut s'expliquer par le fait que le lactosérum contient naturellement une quantité suffisante de leucine pour saturer l'activation de la voie mTOR ; au-delà d'un certain seuil, l'effet anabolique atteint un plateau et l'ajout de leucine ne produit donc pas de gains supplémentaires (76)

Un élément important à prendre en compte est la consommation totale journalière en protéines qui est comprises entre **0,83 et 2,2 g/kg/j** selon les recommandations de l'ANSES (40)

Les effets potentiellement néfastes sur la santé (le foie et le rein) d'une supplémentation en protéines comme mentionnée dans cette revue de 2021 « Whey protein supplementation and its potentially adverse effects on health: a systematic review » (77), est lié d'un côté à des dysfonctionnements préexistants de ces deux organes mais d'un autre côté à la quantité totale de protéines ingérées par jour.

Cet effet néfaste provient du métabolisme des protéines ingérées. En effet, une fois les protéines digérées, elles sont décomposées en acides aminés. Avant qu'un acide aminé puisse être utilisé pour la synthèse des nouvelles protéines ou servir d'énergie, son groupe amine (-NH<sub>2</sub>) doit être éliminé. Ce processus est appelé désamination. Il a lieu dans le foie, où le groupe amine est transformé en ammoniac (NH<sub>3</sub>), un produit toxique pour le corps (en excès, il provoque une **encéphalopathie hépatique** qui est un dérèglement du système nerveux central). L'ammoniac est alors vite converti en urée moins toxique via le cycle de l'urée. Cette urée est acheminée par la suite au niveau des reins où elle sera éliminée.

Ainsi, que les protéines proviennent du lait (protéine de lactosérum) ou d'autres sources alimentaires, l'excès de protéines peut avoir un impact sur la fonction rénale et hépatique, principalement à travers la charge en azote qu'elles entraînent.

Il est donc conseillé de respecter les recommandations en termes de consommation journalière en protéine (bien les répartir sur la journée) et de consommer suffisamment d'eau par jour afin de faciliter l'élimination de l'urée par les reins.

## B. Créatine

### 1. Origine de la créatine corporelle

La créatine (méthylguanidine-acide acétique) est une molécule naturellement présente dans le corps humain, principalement dans les muscles squelettiques (environ 95 %) et les 5% restants sont distribués dans le cerveau, le foie, les reins et les testicules et éventuellement le placenta. Elle est formée de manière endogène à partir de réactions impliquant les acides aminés arginine, glycine et méthionine dans les reins et le foie

La synthèse se déroule en deux étapes principales :

- **Première étape (reins) :** L'arginine et la glycine se combinent pour former la **guanidino-acétate** et de l'ornithine grâce à l'action de l'enzyme arginine-glycine amidinotransférase (AGAT).
- **Deuxième étape (foie) :** La guanidino-acétate est transportée vers le foie, où elle subit une méthylation par l'enzyme guanidino-acétate méthyltransférase (GAMT), utilisant la **méthionine** comme donneur de méthyle pour produire de la **créatine**.

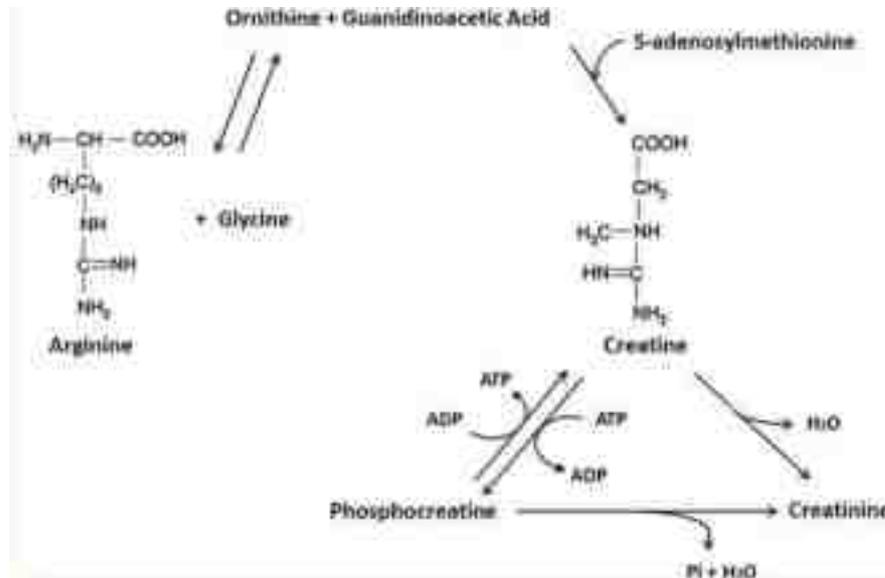


Figure 24: Structure chimique et voie biochimique pour la synthèse de la créatine (78)

En plus de la production endogène, la créatine peut être obtenue à travers l'alimentation de viandes / poissons (un régime contenant environ **500 g de viande ou de poisson** peut fournir environ **2 g de créatine** par jour) et par la supplémentation. La supplémentation en créatine est

courante dans le milieu sportif, notamment avec la créatine monohydrate, la forme la plus couramment utilisée et étudiée pour ses bienfaits (79).

## 2. Transport de la créatine vers les organes cibles

Après avoir traversé la barrière intestinale, la créatine pénètre dans la circulation sanguine et est principalement transportée vers les cellules musculaires. Ce processus s'effectue grâce à des transporteurs spécifiques appelés **transporteurs de créatine (CRT) ou SLC6A8**. Ces transporteurs sont couplés principalement **aux ions sodium ( $\text{Na}^+$ )**, ce qui permet le passage de la créatine à travers la membrane cellulaire des muscles.

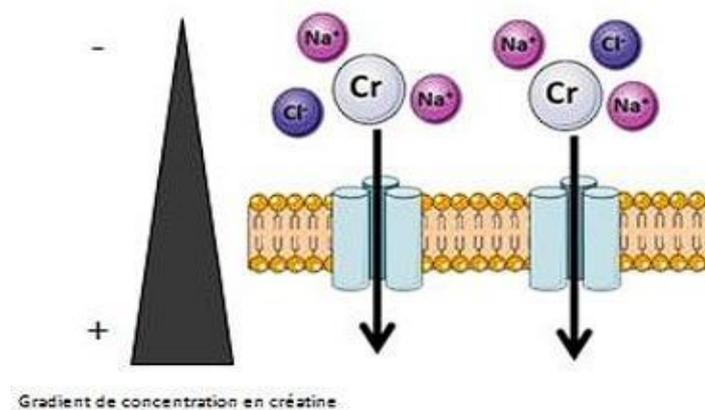


Figure 25: Transport de la créatine

Le transport de la créatine se fait contre un gradient de concentration et il implique 2 ions sodium et un ion chlore pour chaque molécule de créatine transportée (80)

Le mécanisme de transport fonctionne par un cotransport dépendant du gradient électrochimique du sodium. Cela signifie que l'absorption de la créatine dans les cellules musculaires est directement influencée par le gradient de sodium à travers la membrane. En se liant au sodium, la créatine bénéficie de ce gradient, maintenu par la pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  ATPase (transport actif secondaire), rendant le processus plus efficace, une entrée dans la cellule contre son propre gradient de concentration (80)

De plus, le glucose aide indirectement au transport de la créatine dans les muscles grâce à son effet sur l'insuline. La consommation de glucose stimule la sécrétion d'**insuline**, une hormone qui augmente la disponibilité des transporteurs CRT à la surface des cellules musculaires. Cette augmentation de l'insuline améliore ainsi la capacité des cellules à absorber plus de créatine en

rendant le transport plus efficace, d'où l'intérêt de prendre de la créatine avec un repas riche en glucides pour une meilleure absorption au niveau des cellules musculaires (78,81).

### 3. Devenir et rôle de la créatine dans les cellules

Une fois dans les muscles, environ 60 % de la créatine est convertie en **phosphocréatine (PCr)** (ou créatine phosphate) par l'enzyme **créatine kinase (CK)**, tandis que 40 % reste sous forme de créatine libre. Le **pool total de créatine** (créatine + phosphocréatine) dans les muscles peuvent varier entre **100 et 160 mmol/kg** de masse musculaire sèche, selon l'individu, son niveau d'entraînement, son alimentation (notamment la consommation de viande), et d'autres facteurs physiologiques.

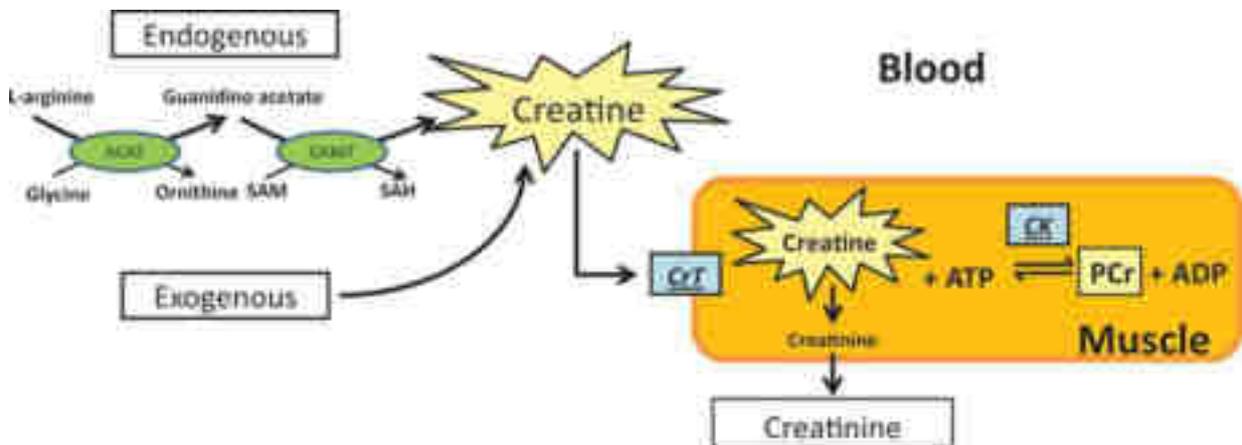


Figure 26 : Cheminement de la créatine (82)

Cependant, une petite partie de la créatine libre dans les muscles se dégrade spontanément en **créatinine (1 à 2%)**, un sous-produit non réutilisable, qui est excrété par les reins dans l'urine. C'est d'ailleurs pour cette raison que la créatine doit être constamment renouvelée, soit par la synthèse endogène, soit par l'alimentation ou la supplémentation. La quantité de créatinine produite est proportionnelle à la masse musculaire d'une personne, car les muscles sont le principal réservoir de créatine.

En moyenne, la synthèse endogène de créatine produit environ **1 gramme par jour**, tandis que l'apport alimentaire (notamment provenant de sources animales comme la viande et le poisson) contribue également d'environ **1 gramme par jour**. Cette synthèse totale offre environ **2 g de**

**créatine par jour**, ce qui est suffisant pour compenser les pertes normales chez une personne en bonne santé qui n'a pas de besoins énergétiques excessifs.

Toutefois, dans des conditions de besoins accrus, comme lors d'une activité physique intense ou d'un régime végétarien, cette synthèse peut ne pas suffire à maintenir des réserves optimales. Le principal rôle de la créatine est de régénérer rapidement l'ATP (adénosine triphosphate). Elle pénètre dans les cellules par l'intermédiaire des transporteurs de créatine (CRT). Une fois à l'intérieur, la créatine (Cr) peut être convertie en phosphocréatine (PCr) grâce à l'action de la créatine kinase couplée à la phosphorylation oxydative mitochondriale (mtCK) qui fournit l'ATP nécessaire à la conversion de créatine en phosphocréatine. De même, la créatine intervient également après la glycolyse (G), où elle produit de la phosphocréatine via la créatine kinase associée à la glycolyse (CK-g).

Dans le cytosol, la créatine kinase soluble cytosolique (CK-c) maintient l'équilibre entre l'ATP et l'ADP (adénosine diphosphate). Enfin, la phosphocréatine est utilisée par la créatine kinase associée aux sites de consommation d'ATP (CK-a) pour régénérer l'ATP, ce qui permet le bon fonctionnement des pompes (83)

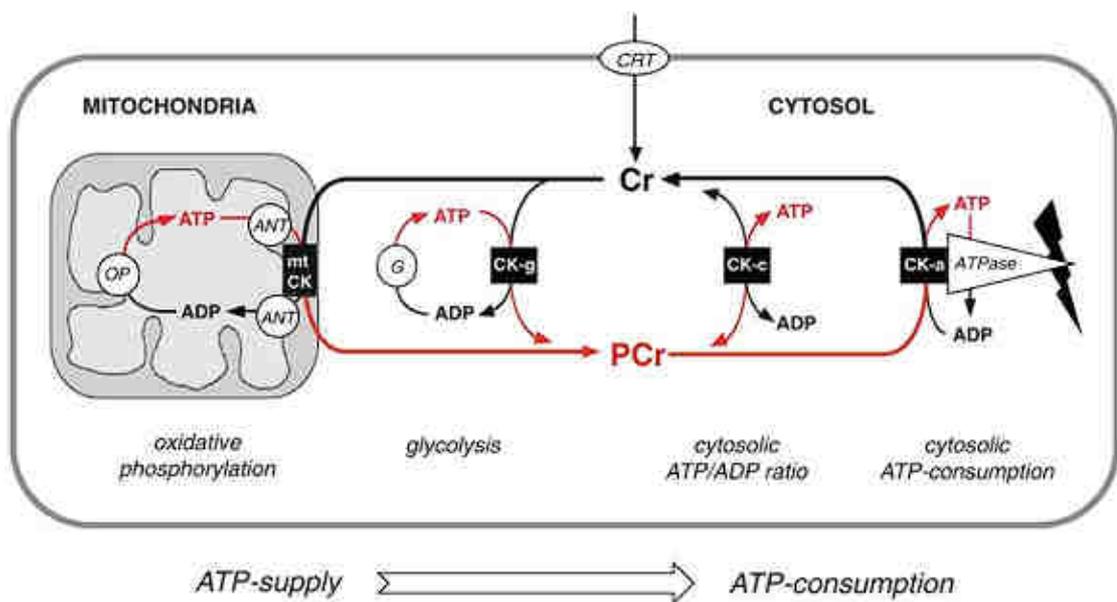


Figure 27 : Système créatine / phosphocréatine /créatine kinase (83)

Ainsi, lors d'un effort musculaire intense, l'ATP est rapidement décomposée en ADP (adénosine diphosphate), libérant de l'énergie pour la contraction musculaire. La phosphocréatine (PCr) présente dans les muscles permet de régénérer l'ATP à partir de l'ADP via l'enzyme créatine

kinase. Ce processus est particulièrement utile pour les efforts courts et explosifs (10 à 15 secondes), comme les sprints ou le levé de poids.

Après un effort intense, les réserves de phosphocréatine doivent être reconstituées. Cela se fait au repos, à l'aide de l'ATP produit par les voies métaboliques plus lentes (comme la phosphorylation oxydative ou la glycolyse) et de la créatine libre. Ce processus de régénération des réserves de phosphocréatine peut prendre plusieurs minutes, ce qui explique pourquoi les athlètes ont besoin de périodes de repos entre les efforts intenses.

Une revue de la Société Internationale de Nutrition Sportive (ISSN) publiée en 2017 a examiné l'efficacité de la supplémentation en créatine. Les résultats ont montré qu'une dose de charge de 20 g par jour, répartie en quatre prises de 5 g pendant 5 à 7 jours, suivie d'une dose d'entretien de 3 à 5 g par jour, entraînait une augmentation de 5 à 15 % de la force maximale et de la puissance explosive lors d'activités telles que les sprints, les levées de poids et d'autres exercices anaérobies. Par exemple, l'étude a révélé que les athlètes pratiquant l'haltérophilie pouvaient réaliser 1 à 2 répétitions supplémentaires lors de leur maximum (1RM) après avoir pris de la créatine (78)

De même, selon des études mentionnées par l'ISSN, la supplémentation en créatine peut contribuer à réduire les dommages musculaires et/ou à améliorer la récupération après un exercice intense.

Une étude intitulée « Creatine supplementation enhances muscle force recovery after eccentrically-induced muscle damage in healthy individuals » a évalué l'impact de la créatine sur la récupération de la force musculaire et les dommages musculaires après un exercice intense (84).

Les résultats ont révélé que les individus ayant pris de la créatine présentaient une force d'extension du genou isocinétique (+10 %) et isométrique (+21 %) nettement supérieure durant la phase de récupération après des lésions musculaires causées par l'exercice. En outre, les concentrations plasmatiques de créatine kinase (CK) étaient considérablement réduites (-84 %) après 2, 3, 4 et 7 jours de récupération chez les participants supplémentés en créatine, comparativement au groupe témoin. Les chercheurs ont conclu que la créatine améliorait la récupération de la fonction musculaire extensrice du genou après une blessure.

Une autre étude intitulée « The effect of creatine supplementation upon inflammatory and muscle soreness markers after a 30km race » a examiné l'effet de la charge en créatine chez des marathoniens avant une course de 30 km sur les marqueurs inflammatoires et la douleur musculaire (85). Ils ont constaté que la supplémentation en créatine entraînait une diminution des niveaux de CK (-19 %), de prostaglandine E2 (-61 %) et de facteur de nécrose tumorale

(TNF alpha) (-34 %), tout en supprimant l'élévation de la lactate déshydrogénase (LDH) par rapport au groupe témoin.

Une étude menée en 2004 a examiné les effets d'une supplémentation en créatine (0,3 g/kg/j) pendant 4 semaines, suivies de 2 semaines de réduction progressive, sur les performances musculaires lors d'un entraînement en résistance (86)

Les résultats ont montré que la créatine permettait de maintenir les performances musculaires durant la phase initiale de l'entraînement, bien qu'elle entraînait de légères baisses de performance par la suite.

Ces résultats suggèrent que la créatine aide les athlètes à mieux supporter des augmentations substantielles du volume d'entraînement. En conclusion, les données disponibles indiquent que la supplémentation en créatine peut améliorer le stockage du glycogène, réduire l'inflammation et/ou l'efflux d'enzymes musculaires après un exercice intense, et aider les athlètes à mieux tolérer des volumes d'entraînement élevés ou des efforts excessifs, favorisant ainsi la récupération.

#### **4. Utilisation et sécurité de la créatine**

Bien qu'il existe plus de 500 publications évaluées par des pairs concernant la supplémentation en créatine, il est quelque peu surprenant que des questions concernant l'efficacité et l'innocuité de la créatine subsistent. Voici une partie des questions qui reviennent le plus (87) :

- a. La créatine entraîne-t-elle la rétention d'eau ?
- b. La créatine est-elle un stéroïde anabolisant ?
- c. La créatine provoque-t-elle des lésions rénales/un dysfonctionnement rénal ?
- d. Une « phase de charge » de créatine est-elle nécessaire ?
- e. La créatine provoque-t-elle la perte de cheveux / la calvitie ?

Pour répondre à ces questions, une équipe d'experts de recherche de renommée internationale a été formée pour effectuer une évaluation scientifique fondée sur des preuves de la littérature concernant la supplémentation en créatine (87). Voici les réponses aux différentes questions :

a. La créatine entraîne-t-elle la rétention d'eau ?

La créatine est absorbée dans les cellules musculaires par un transporteur de créatine dépendant du sodium. Étant donné que le transport implique du sodium, l'eau sera également absorbée dans les muscles pour aider à maintenir l'osmolalité intracellulaire. Cependant, compte tenu de l'activité des pompes sodium-potassium, il est peu probable que la concentration intracellulaire de sodium soit considérablement affectée par la supplémentation en créatine.

Plusieurs études ont examiné si la supplémentation en créatine entraînait une modification mesurable de la répartition des fluides corporels, en particulier l'eau intracellulaire (ICW), l'eau extracellulaire (ECW) et l'eau corporelle totale (TBW). De manière générale, les résultats indiquent une absence de changement significatif de ces compartiments hydriques, malgré une prise régulière de créatine sur plusieurs semaines.

Par exemple, chez des hommes entraînés à la résistance, une supplémentation en créatine à raison de 0,3 g/kg de masse corporelle maigre par jour pendant 7 jours (soit environ 20 g/jour), suivie de 0,075 g/kg/jour pendant 4 semaines (soit environ 5 g/jour), n'a provoqué aucune modification notable de l'ICW, de l'ECW ni de la TBW (88)

Ces résultats ont été confirmés par une autre étude utilisant un protocole similaire (20 g/jour pendant 7 jours, puis 5 g/jour pendant 21 jours), qui n'a pas non plus observé d'augmentation significative de l'eau intracellulaire, extracellulaire ou totale chez des sujets entraînés à la musculation (89).

Enfin, une étude réalisée sur une population de participants non entraînés à la résistance a également montré des résultats comparables. Une supplémentation en créatine de 0,3 g/kg de masse corporelle maigre pendant 5 jours, suivie de 0,075 g/kg/jour pendant six semaines, n'a induit aucun changement significatif de l'eau corporelle totale (90)

Cependant, d'après une revue des essais cliniques randomisés entre 2012 et 2021 (91), la supplémentation en créatine entraîne une augmentation notable du poids corporel, particulièrement visible au cours des premiers jours ou semaines. Ce gain de poids, estimé entre 1 et 2 kg, est principalement dû à la rétention d'eau intracellulaire plutôt qu'à un gain direct de masse musculaire. Cette rétention est accentuée par la phase de charge, où la dose de créatine est de 20 g par jour pendant 5 à 7 jours. Des études montrent que cette rétention d'eau peut représenter entre 70 et 80 % du gain de poids total pendant cette période.

Après cette phase de chargement, une dose d'entretien de 3 à 5 g par jour permet de stabiliser la rétention d'eau tout en favorisant la croissance musculaire. Bien que temporaire, cette rétention d'eau améliore l'hydratation musculaire, ce qui accroît l'efficacité et la récupération

des muscles, contribuant ainsi à une meilleure performance physique. Ce phénomène, bien documenté, est particulièrement bénéfique pour les athlètes cherchant à optimiser leurs capacités à court terme.

En résumé, bien que certaines études indiquent que la supplémentation en créatine peut entraîner une augmentation de la rétention d'eau à court terme, principalement en raison de l'augmentation du volume d'eau intracellulaire, d'autres recherches montrent que sur des périodes plus longues, elle n'affecte pas l'eau corporelle totale (intra ou extracellulaire) par rapport à la masse musculaire. Ainsi, la créatine ne semble pas provoquer de rétention d'eau durablement, suggérant que cet effet est transitoire et dépend de la phase initiale de supplémentation.

#### b. La créatine est-elle un stéroïde anabolisant ?

Les stéroïdes anabolisants sont une version synthétique de la testostérone, une hormone androgène qui est également produite de manière endogène chez les hommes et les femmes, et est utilisée en conjonction avec l'entraînement en résistance dans le but d'améliorer la masse musculaire et la force en raison de l'augmentation de la synthèse des protéines musculaires.

La supplémentation en créatine, cependant, peut augmenter la capacité d'ATP et l'énergie produite lors d'exercices anaérobies intenses, augmentant ainsi la puissance musculaire, les répétitions et le volume d'exercice, ce qui peut par la suite contribuer à la performance musculaire et à l'hypertrophie au cours d'une période d'entraînement (78)

Bien que la créatine et les stéroïdes anabolisants puissent tous deux être utilisés dans le cadre de la performance sportive, ils diffèrent profondément par leur composition, leur mode d'action et leur statut légal. La créatine est un complément naturel qui soutient l'énergie musculaire, tandis que les stéroïdes anabolisants altèrent artificiellement les hormones, ce qui les rend dangereux et illégaux dans le cadre du sport non thérapeutique.

En France, les stéroïdes anabolisants sont considérés comme des substances dopantes, interdits dans le cadre sportif et soumis à une régulation stricte. Ils sont classés comme des médicaments, et leur usage est contrôlé par le **Code du sport** et le **Code de la santé publique**. Leur utilisation sans prescription médicale est illégale et peut entraîner des sanctions pénales. L'**Agence Française de Lutte contre le Dopage (AFLD)** surveille et régule leur usage, suivant les recommandations de l'**Agence Mondiale Antidopage (AMA)**. De plus, la **loi n° 99-223 du 23 mars 1999** réprime l'usage des produits dopants en milieu sportif en France. La possession et

l'administration de stéroïdes sans ordonnance peuvent entraîner des amendes et peines de prison(92)

En revanche, la créatine est considérée comme un complément alimentaire en France, et son usage est libre. Elle est régulée par des décrets spécifiques aux compléments alimentaires, notamment le décret **n°2006-352** qui encadre la sécurité des produits. Le **Ministère de la Santé** recommande des doses de créatine inférieures à **3 g par jour** bien que ce dosage ne soit pas rigoureusement fixé par la loi (93)

c. La créatine provoque-t-elle des lésions rénales/un dysfonctionnement rénal ?

Aujourd'hui, après plus de 20 ans de recherche qui ne démontre aucun effet indésirable des doses recommandées de suppléments de créatine sur la santé rénale, malheureusement, cette préoccupation persiste. Bien que l'origine soit inconnue, le lien entre la supplémentation en créatine et les lésions rénales/dysfonctionnement rénal pourrait être attribué à deux choses : une mauvaise compréhension de la créatine et de son métabolisme.

L'étude intitulée "Effects of Creatine Supplementation on Renal Function: A Systematic Review and Meta-Analysis" examine les effets de la supplémentation en créatine sur la fonction rénale, en particulier dans le contexte de l'inquiétude fréquente selon laquelle la créatine pourrait endommager les reins (94).

Les chercheurs ont analysé plusieurs études impliquant des humains et ont observé l'effet de la créatine sur différents indicateurs de la fonction rénale, notamment les niveaux de créatinine sérique et le taux de filtration glomérulaire (GFR), deux marqueurs clés utilisés pour évaluer la santé des reins.

La méta-analyse n'a pas trouvé de preuves solides indiquant que la créatine, prise dans les doses recommandées (habituellement 3 à 5 g par jour après une phase de charge), cause des dommages rénaux. Même les études à long terme n'ont pas révélé de détérioration de la fonction rénale.

Bien que la créatine augmente parfois les niveaux de créatinine dans le sang (qui est un sous-produit normal du métabolisme de la créatine), cette élévation ne signifie pas nécessairement une altération de la fonction rénale. La créatinine est un indicateur indirect de la fonction rénale, et une augmentation due à la supplémentation peut être interprétée à tort comme une maladie

rénale, ce qui a pu causer des malentendus dans des études antérieures. En réalité, cette hausse peut être liée à la quantité supplémentaire de créatine consommée, et non à une défaillance rénale.

L'étude conclut que la créatine, lorsqu'elle est utilisée de manière responsable et aux doses recommandées, est sûre pour la majorité des utilisateurs, sans risque important pour la fonction rénale. Les inquiétudes quant aux dommages rénaux résultant de la créatine semblent exagérées et reposent sur des malentendus concernant l'élévation de la créatinine sérique.

En résumé, la supplémentation en créatine ne semble pas causer de dommages rénaux notables, mais des tests basés uniquement sur la créatinine sérique doivent être interprétés avec prudence pour éviter des diagnostics erronés.

d. Une « phase de charge » de créatine est-elle nécessaire ?

La « charge » de créatine est définie comme une supplémentation en créatine orale pendant 5 à 7 jours à une dose de 20 à 25 g/jour, souvent divisée en doses plus petites tout au long de la journée (par exemple, quatre à cinq portions de 5 g par jour). Une « charge » de créatine peut également être prescrite par rapport à la masse corporelle, par exemple 0,3 g/kg/j pendant 5 à 7 jours (c'est-à-dire 21 g/jour pour une personne de 70 kg). La phase de « charge » de la supplémentation en créatine est suivie d'une phase quotidienne de « maintenance », allant souvent de 3 à 5 g par jour.

Bien que la phase de « charge » en créatine (prise élevée de créatine sur une courte période) soit souvent perçue comme nécessaire pour augmenter les réserves de créatine intramusculaire, des méthodes de dosage quotidien plus faibles (3-5 g par jour) peuvent également être efficaces. Ces stratégies plus douces augmentent progressivement les réserves de créatine, bien qu'elles prennent plus de temps pour atteindre des niveaux maximaux.

Une étude clé a montré qu'une supplémentation quotidienne de 3 g pendant 28 jours produisait une augmentation similaire de créatine dans les muscles (~20 %) par rapport à une phase de charge de 20 g par jour pendant 6 jours. Il est donc recommandé de consommer 3-5 g par jour pendant au moins quatre semaines pour atteindre une saturation musculaire comparable (95).

Par exemple, si un athlète espère maximiser le potentiel ergogénique de la supplémentation en créatine dans un laps de temps très court (< 30 jours), l'adoption de la stratégie de « charge » de créatine peut être conseillée. Cependant, si un athlète ou une personne qui fait de l'exercice prévoit d'ingérer de la créatine sur une période prolongée (> 30 jours), ou s'il évite la prise de

poinds potentielle qui peut parfois se produire pendant la « charge » de créatine, la stratégie de « maintenance » de la créatine serait une option viable. De plus, lors d'une phase de charge, il est conseillé de répartir les doses pour éviter des troubles gastro-intestinaux, car des doses supérieures à 10 g à la fois peuvent causer des problèmes.

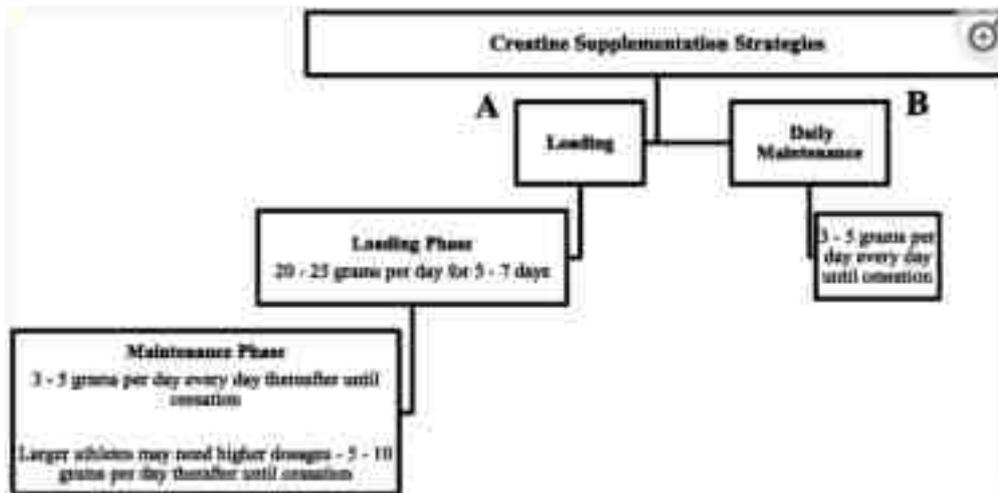


Figure 28: Différentes stratégies de supplémentation en créatine (79)

e. La créatine provoque-t-elle la perte de cheveux / la calvitie ?

La créatine monohydrate, complément populaire chez les sportifs pour ses effets sur la performance et la prise de masse, suscite toutefois une controverse liée à une possible perte de cheveux.

En effet, une controverse persiste concernant son éventuelle implication dans la perte de cheveux, en particulier par une augmentation des niveaux de dihydrotestostérone (DHT), un androgène lié à l'alopecie androgénétique. La DHT est un métabolite de la testostérone, formé lorsque l'enzyme 5-alpha-réductase convertit la testostérone libre en DHT. Chez les hommes, la DHT peut se lier aux récepteurs d'androgènes dans les follicules pileux sensibles et les faire rétrécir, entraînant finalement une perte de cheveux (96)

Deux études clés ont exploré cette hypothèse, avec des résultats contrastés.

La première étude, publiée en 2009, est souvent citée comme origine de cette controverse (97). Réalisée auprès de 20 joueurs de rugby universitaires, cette étude en double aveugle randomisée a observé les effets de trois semaines de supplémentation en créatine.

Deux groupes ont été réalisés selon la répartition suivante :

- **Groupe créatine :**

- Phase de charge : 25 g/jour de créatine + 25 g/jour de glucose pendant 7 jours.

- Phase de maintenance : 5 g/jour de créatine + 25 g/jour de glucose pendant 14 jours.

- **Groupe placebo :**

- Phase de charge : 50 g/jour de glucose pendant 7 jours.

- Phase de maintenance : 30 g/jour de glucose pendant 14 jours.

Après une phase de charge (25 g/jour pendant 7 jours), suivie d'une phase de maintenance (5 g/jour pendant 14 jours), les résultats ont montré une augmentation significative de la DHT (+56 % à J7, +40 % à J21), sans modification des taux de testostérone totale (aucune mesure de la testostérone libre a été réalisée). Le ratio DHT/testostérone a également augmenté (+36 % à J7, +22 % à J21), suggérant une conversion accrue de la testostérone en DHT. Néanmoins, aucune mesure directe de la santé capillaire n'a été effectuée dans cette étude. Ces résultats ont été interprétés comme un possible mécanisme par lequel la créatine pourrait théoriquement favoriser la perte de cheveux, bien que cette relation reste hypothétique.

En réponse à cette hypothèse, une étude plus récente, publiée en 2025, a adopté une approche plus rigoureuse pour évaluer le lien entre créatine et santé capillaire (98)

Cette étude randomisée en double aveugle a porté sur 45 hommes entraînés en musculation, répartis en deux groupes recevant soit 5 g/jour de créatine monohydrate, soit un placebo (5 g/jour de maltodextrine) pendant 12 semaines.

Contrairement à l'étude de 2009, aucune phase de charge n'a été utilisée. Les chercheurs ont mesuré non seulement les taux hormonaux (testostérone totale, testostérone libre, DHT), mais aussi des paramètres objectifs de la santé capillaire (densité, épaisseur et nombre d'unités folliculaires) à l'aide d'un système d'analyse dermatologique (FotoFinder)

Les conditions préalables étaient les suivantes : au moins un an de pratique régulière de la musculation, pas de lavage des cheveux 24 à 48 heures avant l'examen, pas de produits coiffants ni de traitements chimiques récents.

Bien que l'on ait observé une augmentation de la testostérone totale ( $\Delta$  = valeur post moins valeur pré : créatine =  $\Delta 124 \pm 149$  ng/dL ; placebo =  $\Delta 216 \pm 203$  ng/dL) et une diminution de la testostérone libre (créatine :  $-9,0 \pm 8,7$  pg/mL ; placebo :  $-9 \pm 6,4$  pg/mL) au cours de l'étude,

ces variations se sont produites de manière similaire dans les deux groupes et ne sont donc pas attribuables à la supplémentation en créatine. Par ailleurs, aucune différence significative n'a été constatée entre les groupes concernant les niveaux de DHT, le ratio DHT/testostérone ou les indicateurs de croissance capillaire.

Ces résultats contredisent les données de 2009 et suggèrent que la supplémentation en créatine, du moins à dose modérée et sans phase de charge, n'a pas d'effet délétère sur la santé capillaire chez l'homme jeune pratiquant la musculation.

En conclusion, bien que des résultats isolés aient montré une augmentation des niveaux de DHT après une supplémentation en créatine, aucune preuve directe ne permet d'affirmer un lien de causalité entre la créatine et la perte de cheveux. L'étude de 2025, plus robuste méthodologiquement et incluant une évaluation directe de la chevelure, ne montre aucun effet significatif. Ainsi, à ce jour, les données scientifiques disponibles ne justifient pas d'associer la créatine à un risque avéré d'alopécie

### **C. BCAA (Acides Aminés à Chaîne Ramifiée)**

**Les BCAA**, ou acides aminés à chaîne ramifiée, comprennent trois acides aminés essentiels : la leucine, l'isoleucine et la valine.

Ces acides aminés représentent environ un tiers des protéines musculaires. Ils font notamment partis des 9 acides aminés essentiels. Contrairement aux autres acides aminés métabolisés dans le foie, les acides aminés à chaîne ramifiée sont oxydés directement dans les mitochondries musculaires comme source d'énergie, en particulier lorsque les réserves de glycogène sont épuisées. Au cours de cette phase, les muscles consomment des lipides et des protéines, en utilisant notamment les acides aminés à chaîne ramifiée comme carburant.

Lorsqu'ils sont consommés en complément, ils arrivent directement sous forme libre dans les muscles, sans nécessiter de dégradation préalable, ainsi ils constitueront une forme d'énergie directement disponible pour le muscle. Leur principal rôle est de prévenir la dégradation des protéines musculaires, agissant ainsi comme un puissant agent anti-catabolique, raison pour laquelle ils sont souvent consommés autour de l'entraînement.

Sur les produits contenant des BCAA, un ratio est généralement indiqué sur l'emballage, par exemple 2:1:1, ce qui signifie que pour chaque part d'isoleucine et de valine, il y a deux parts de leucine. Certains fabricants proposent des ratios plus élevés, comme 4:1:1 ou 8:1:1, mais cela est souvent motivé par des raisons marketing et n'apporte pas nécessairement de bénéfices

supplémentaires (cf. études sur la whey). L'important est d'assurer une proportion adéquate de leucine, qui joue un rôle clé dans l'anabolisme musculaire. En général, la dose habituellement recommandée en supplémentation est de 5 à 10 g par jour, car la whey en contient déjà, tout comme nos sources de protéines naturelles.

Comme mentionné précédemment dans une étude sur la whey enrichie en leucine, cet acide aminé faisant partie des BCAA est capable de stimuler la synthèse des protéines musculaires (MPS) tant au repos qu'après un exercice de résistance. Cependant, bien que l'ingestion de BCAA isolés puisse augmenter temporairement les taux de MPS, cette stimulation reste sous-optimale comparée à celle obtenue après la consommation d'une protéine complète, comme le lactosérum, qui fournit non seulement des BCAA mais aussi l'ensemble des acides aminés essentiels nécessaires à un soutien optimal de la synthèse protéique musculaire.

Cette affirmation s'appuie sur une étude menée en 2019 qui a comparé l'impact de l'ingestion de 6 g de BCAA et de 30 g de protéines de lait (contenant 6 g de BCAA) sur l'activation de la MPS au repos chez des hommes. Bien que l'activation de la MPS ait été similaire entre les deux groupes immédiatement après ingestion, la durée de cette stimulation a été significativement plus courte après la prise de BCAA seuls (~2 heures), tandis qu'avec les protéines de lait, la stimulation est restée élevée jusqu'à 5 heures. Cette différence s'explique par le fait que les protéines de lait apportent, en plus des BCAA, d'autres acides aminés essentiels (AAE) qui sont cruciaux pour maximiser la synthèse des protéines musculaires (99).

De même, plusieurs études ont également comparé l'impact de l'ingestion de BCAA et de protéines de lactosérum (whey) après un entraînement de musculation. Parmi ces dernières, une étude de 2017 a révélé que bien que les BCAA favorisent une augmentation de la MPS post-exercice, cette augmentation est environ 50 % inférieure à celle observée avec une protéine de lactosérum (whey) contenant la même quantité de BCAA (100).

Ainsi, la supplémentation isolée en BCAA n'est ni nécessaire ni plus efficace que la consommation de protéines complètes. Les effets des BCAA seuls sont inférieurs à ceux apportés par les EAA (complément contenant les 9 acides aminés essentiels) ou par une protéine complète, comme celle du lactosérum, qui fournissent tous les deux la même quantité de BCAA. Pour optimiser la croissance et la récupération musculaires, il est préférable de se concentrer sur un régime alimentaire équilibré, riche en protéines complètes. Un tel régime assure naturellement un apport suffisant de tous les acides aminés essentiels, y compris les

BCAA, et crée ainsi un environnement propice à la santé musculaire et aux performances sportives. Par conséquent, la supplémentation en BCAA n'est pas nécessaire si votre apport protéique quotidien est suffisant.

**BCAA ou EAA lesquels choisir pour quel objectif ?**

BCAA	EAA
Teneur : 3 acides aminés essentiels	Teneur : 9 acides aminés essentiels
Turques : leucine, valine, isoleucine	Turques : leucine, isoleucine, valine, lysine, glycine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane, valine
Tendances : Energie endurance, maintien musculaire	Tendances : Energie endurance, maintien musculaire, réparation, équilibre, carences nutritionnelles, santé
Pour qui : Pour les personnes entraînés pratiquant la musculation qui ont déjà de bonnes bases, mangent suffisamment de protéines et souhaitent un bonus de muscle	Pour qui : Pour les personnes moins entraînés ou moins strictes avec leur diète, ayant des apports insuffisants de protéines complètes dans l'objectif de la remise en forme, la fitness, la bonne santé ou l'endurance
Dose : 5g	Dose : 10g

Figure 29 : Comparaison deux compléments alimentaires : BCAA et EAA (101)

#### D. Collagènes

Le collagène est une protéine structurale essentielle du corps humain, représentant environ 30 % des protéines totales du corps. Il constitue le principal composant des tissus conjonctifs tels que la peau, les os, les ligaments, les tendons et le cartilage.

Le collagène est une protéine fibreuse complexe constituée de trois chaînes polypeptidiques alpha, étroitement enroulées pour former une structure en triple hélice. Chaque chaîne alpha comprend environ 1 055 acides aminés, principalement de la glycine, de la lysine et de la proline hydroxylées. En s'associant de diverses manières, ces acides aminés permettent la formation d'environ 28 types de collagène distincts dans l'organisme. (102)

La diminution de la production de collagène avec l'âge est bien documentée. Dès 25 ans, la synthèse du collagène commence à ralentir, avec une diminution d'environ 1,5% par an. Cette réduction s'intensifie après 50 ans, pouvant atteindre jusqu'à 30% de moins chaque année.

Parmi les différents types de collagène présents dans l'organisme, les plus courants sur le marché des additifs sont :

- Le **collagène de type I** : le plus abondant (90%) et se situe dans la peau, les os et les tendons,
- Le **collagène de type II** : il entre essentiellement dans la structure du cartilage
- Le **collagène de type III** : présent dans les muscles et les parois des vaisseaux.

### **1. Origine du collagène**

Le collagène est exclusivement d'origine animale, car les plantes ne contiennent pas de collagène.

Les suppléments de collagène disponibles sur le marché proviennent principalement de deux sources : **bovine** et **marin**

Le collagène, doit être consommé sous forme hydrolysée pour une meilleure absorption par l'organisme. L'hydrolyse décompose la molécule de collagène, dont le poids moléculaire dépasse 300 000 Daltons, en peptides de plus petite taille (entre 2 000 et 5 000 Daltons)

Cette réduction de taille améliore la biodisponibilité des peptides de collagène, leur permettant de traverser plus facilement la barrière intestinale et d'être efficacement utilisés par l'organisme.

### **2. Différence entre le collagène bovin et marin**

Le **collagène bovin** est obtenu à partir de la peau, des os et des tendons des carcasses de bovidés. Il est particulièrement riche en collagène de type I et II.

En revanche, le **collagène marin**, issu principalement de la peau et des écailles de poissons, est riche exclusivement en collagène de type I, qui est un composant essentiel de la peau, des tendons et des ligaments humains.

Une différence notable entre ces deux types de collagène réside dans leur poids moléculaire. Le collagène marin a un poids moléculaire plus faible que le collagène bovin, ce qui facilite son absorption par l'organisme.

Le **collagène marin** est également une meilleure alternative pour les personnes qui évitent les produits bovins, par exemple pour des raisons religieuses ou allergiques. Cependant, le **collagène bovin** peut être privilégié par ceux qui ne sont pas concernés par ces questions et qui recherchent un produit plus économique. (103)

### 3. Sécurité et efficacité

La vitamine C contribue au renforcement des fibres de collagène et améliore l'absorption du fer non hémérique, présent dans les aliments d'origine végétale.

La vitamine C joue un rôle essentiel dans la synthèse du collagène en tant que cofacteur des enzymes prolyl-hydroxylase et lysyl-hydroxylase. Ces enzymes catalysent l'hydroxylation des résidus de proline et de lysine au sein du procollagène, un précurseur du collagène. Cette modification est indispensable à la stabilisation de la triple hélice du collagène, assurant ainsi sa solidité et sa fonctionnalité dans les tissus conjonctifs.

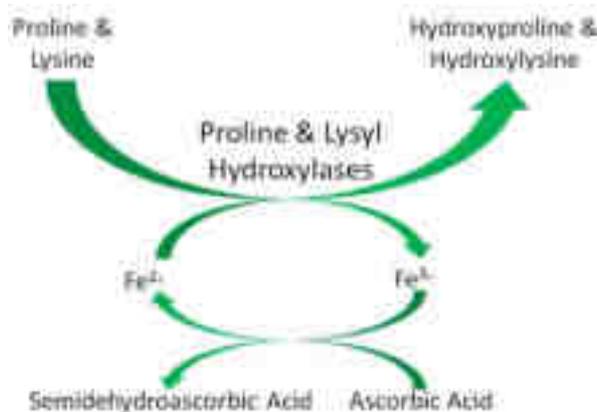


Figure 30 : Intervention de la vitamine C comme cofacteur dans la synthèse du collagène(104)

La vitamine C intervient donc en maintenant le fer ferreux ( $Fe^{2+}$ ) à l'état réduit, ce qui est nécessaire à l'activité des hydroxylases. Sans cette intervention, le collagène produit est défectueux, entraînant une perte de résistance des tissus.

L'absence de vitamine C compromet ces étapes, provoquant des anomalies structurales et fonctionnelles du collagène, comme observé dans le scorbut, qui se manifeste par une fragilité vasculaire, des troubles articulaires et une cicatrisation déficiente.

Quel intérêt la prise de collagène peut avoir pour un sportif et principalement pour une prise de masse musculaire accrue

L'étude intitulée "24-Week study on the use of collagen hydrolysate as a dietary supplement in athletes with activity-related joint pain" de 2008 est un essai clinique contrôlé randomisé, en

double aveugle et contrôlé par placebo, visant à évaluer l'efficacité de la supplémentation en collagène hydrolysé type I chez les athlètes souffrant de douleurs articulaires liées à l'activité physique (105)

L'étude a impliqué 147 athlètes (72 hommes, 75 femmes) présentant des douleurs articulaires dues à leur pratique sportive. Les participants ont été répartis aléatoirement en deux groupes : un groupe supplémenté avec 10 grammes de collagène hydrolysé par jour et un groupe placebo recevant 25 ml de liquide contenant du xanthane. La durée de l'étude était de 24 semaines, au cours desquelles les athlètes ont évalué leurs symptômes articulaires et ont observé leur mobilité.

Les résultats ont montré que la supplémentation en collagène hydrolysé a conduit à une réduction significative de la douleur articulaire chez les athlètes. En effet, ceux ayant reçu du collagène ont rapporté une diminution notable des symptômes douloureux par rapport au groupe placebo. En outre, une amélioration de la mobilité articulaire a été observée dans le groupe supplémenté, ce qui a contribué à une meilleure qualité de vie et à une réduction de l'impact des douleurs articulaires sur leurs performances sportives.

Une autre étude intitulée « Improvement of activity-related knee joint discomfort following supplementation of specific collagen peptides » menée en 2017 a évalué l'efficacité des peptides de collagène bioactifs de type I (BCP) chez des adultes jeunes et actifs présentant des douleurs articulaires au genou. (106)

Il s'agissait d'un essai clinique randomisé, en double aveugle et contrôlé par placebo.

L'étude a inclus 139 participants (56 hommes et 83 femmes), âgés en moyenne de 24 ans, pratiquant régulièrement une activité physique (au moins trois heures par semaine). Les participants ont été répartis en deux groupes : l'un recevant 5 g de collagène par jour pendant 12 semaines, l'autre un placebo.

L'objectif principal était d'évaluer l'évolution de la douleur articulaire lors de l'activité physique, mesurée à l'aide d'une échelle visuelle analogique (EVA). Les objectifs secondaires comprenaient l'évaluation de la douleur au repos, l'amplitude de mouvement du genou et le recours à d'autres traitements

Après 12 semaines de supplémentation :

- Réduction significative de la douleur pendant l'activité physique : -19,5 points en moyenne sur l'échelle visuelle analogique (EVA) dans le groupe collagène, contre -13,9 points dans le groupe placebo

- Aucune différence significative n'a été observée concernant la douleur au repos ou l'amplitude articulaire, probablement en raison d'une mobilité normale en début d'étude.
- Le groupe collagène a toutefois eu moins recours à d'autres formes de traitement pour soulager leurs douleurs articulaires.

Cette étude suggère donc que la supplémentation en peptides de collagène peut partiellement réduire l'inconfort articulaire lié à l'activité physique chez les personnes actives

Bien que plusieurs études aient montré une certaine efficacité de la supplémentation en collagène pour réduire les douleurs articulaires, des doutes persistent concernant l'efficacité du collagène.

En effet, bien que des effets positifs aient été observés, deux préoccupations majeures concernant ces résultats sont mises en avant. (107)

D'une part, le Dr Francis Berenbaum de l'INSERM (107) insiste sur le manque de preuves à long terme sur l'efficacité de la supplémentation en collagène. Les études existantes ne permettent pas encore d'affirmer si ces bienfaits observés sont durables et si la supplémentation pourrait réellement prévenir les maladies articulaires chroniques sur le long terme.

D'autre part, il met en évidence l'absence de mécanisme physiologique clairement prouvé. En effet, lorsque le collagène est ingéré, il est dégradé en acides aminés. Ces derniers peuvent ensuite être utilisés par l'organisme pour la synthèse de diverses protéines, y compris du collagène. Ainsi il n'est pas prouvé que ces acides aminés soient spécifiquement utilisés pour la synthèse de collagène dans les articulations.

Ces points montrent que bien que les résultats actuels soient prometteurs, des études supplémentaires sont nécessaires pour confirmer l'efficacité à long terme du collagène et mieux comprendre son mode d'action exact dans les articulations (107).

Par contre, une revue systématique de 2021 a analysé 15 essais cliniques sur les effets des peptides de collagène associés à l'exercice. Elle conclut que, bien que le collagène stimule la synthèse du collagène tissulaire (notamment avec 15 g/jour), il semblerait que le collagène n'est pas de réel effet sur la synthèse de protéine comparé à des protéines de haute qualité, comme la whey (108)

## **E. Arginine et Citrulline**

### **1. Différence entre Arginine et Citrulline**

L'arginine est un précurseur direct de l'oxyde nitrique (NO). Lorsqu'elle est ingérée, elle est rapidement convertie en NO par l'enzyme *oxyde nitrique synthase* (NOS), entraînant une vasodilatation et un flux sanguin accru vers les muscles, ce qui favorise l'apport en nutriments et en oxygène durant l'exercice, améliorant ainsi la performance et réduisant la fatigue musculaire.

L'arginine est un acide aminé largement utilisé pour augmenter les performances musculaires, ce qui explique sa présence dans de nombreux pré-workouts destinés à être ingérés avant l'entraînement.

Cependant, l'arginine a un métabolisme rapide et une biodisponibilité limitée.

Après ingestion, la L-arginine est absorbée dans l'intestin. Une partie est immédiatement métabolisée par les enzymes intestinales et l'autre partie est ensuite transportée vers le foie, où elle subit une transformation importante.

Dans le foie, elle est rapidement métabolisée par l'arginase en ornithine et en urée, ce qui signifie qu'une quantité réduite d'arginine atteint la circulation sanguine sous forme active. Par conséquent, l'effet attendu sur la production d'oxyde nitrique (NO) est limité.

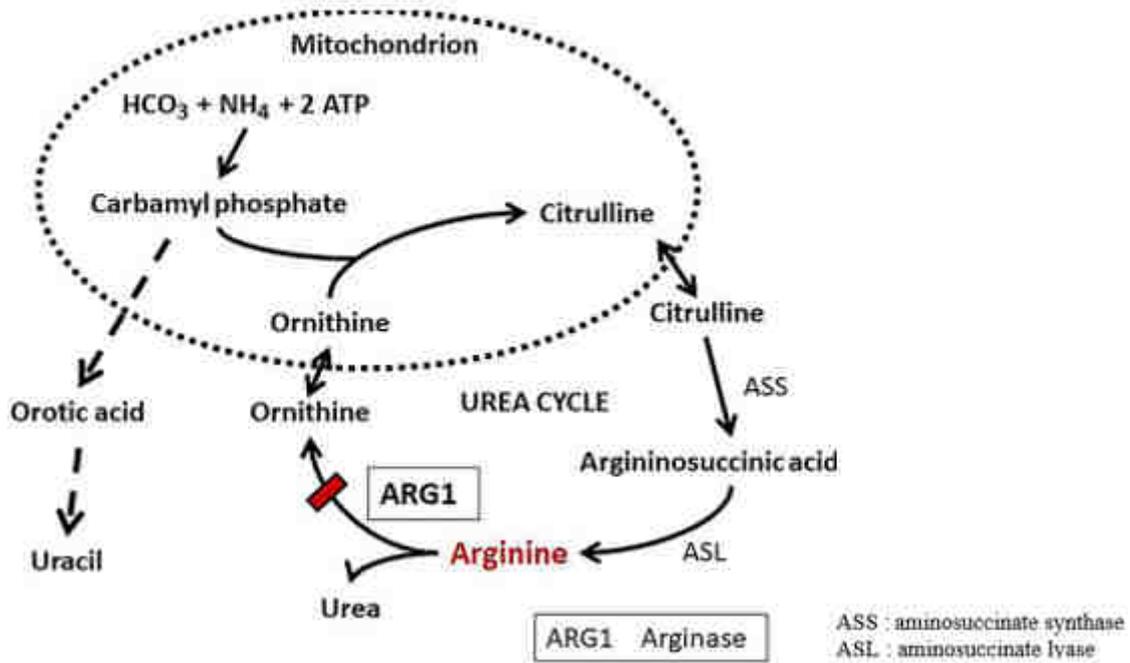


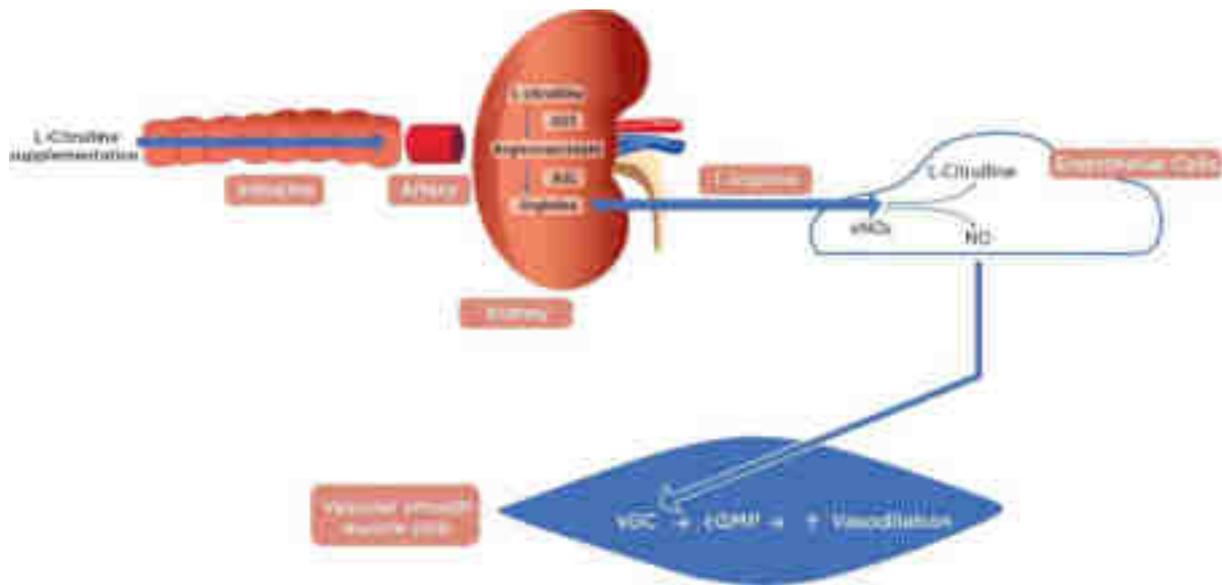
Figure 31 : Devenir de l'arginine dans le foie (109)

Pour éviter ce phénomène d'effet de premier passage hépatique, certains chercheurs et sportifs se penchent sur la citrulline.

Lorsque la citrulline est ingérée, elle est rapidement absorbée par l'intestin grêle et passe dans le système sanguin. Contrairement à l'arginine, la citrulline n'est pas métabolisée dans l'intestin ou le foie, ce qui permet à une plus grande quantité de citrulline de parvenir directement dans la circulation sanguine.

Une fois dans le sang, la citrulline se répartit dans tout le corps et atteint les reins et les tissus périphériques.

Dans les reins, cette dernière subit une conversion en L-arginine par l'action des enzymes ASS et ASL. Ce processus est important, car la citrulline devient ainsi un précurseur de l'arginine.



**Figure 32** : Devenir de la citrulline apportée par voie orale

Une fois formée, l'arginine est libérée dans le sang et atteint les cellules endothéliales (cellules qui tapissent les vaisseaux sanguins).

L'arginine est ensuite utilisée par l'enzyme oxyde nitrique synthase (NOS), présente dans les cellules endothéliales des vaisseaux sanguins, pour produire de l'oxyde nitrique (NO). Le NO est un vasodilatateur, ce qui signifie qu'il dilate les vaisseaux sanguins, augmentant ainsi le flux sanguin.

Cette conversion est plus soutenable et prolongée que la supplémentation directe en arginine, car la citrulline reste active plus longtemps dans le corps et permet de maintenir des niveaux d'arginine plus élevés pendant une période prolongée (donc accélère aussi la récupération post-exercice) (110).

## **2. Sécurité et efficacité**

Au vu du rôle de la citrulline vu ci-dessus, on a tendance à s'imaginer que son efficacité est assurée. Cependant, les études scientifiques sur son efficacité présentent des résultats mitigés. Certaines études suggèrent des effets bénéfiques. Par exemple, une supplémentation de 6 g/jour de citrulline pendant 7 jours améliorait la perception de fatigue musculaire et améliorait la fréquence de pédalage lors d'une simulation en laboratoire d'exercice de haute intensité. (111)

De plus, une étude randomisée en double aveugle croisée, publiée en 2016, a évalué les effets de la L-citrulline sur la performance chez 22 hommes entraînés. Les participants ont reçu soit 2,4 g/jour de L-citrulline, soit un placebo pendant 7 jours, puis une dose supplémentaire une heure avant un contre-la-montre cycliste de 4 km. Les résultats ont montré une amélioration significative de la performance avec la L-citrulline, réduisant le temps de course de 1,5 % par rapport au placebo (112).

Les auteurs ont avancé l'hypothèse que ces améliorations sont probablement liées à l'augmentation des niveaux de L-arginine et, par conséquent, à une production accrue d'oxyde nitrique, ce qui pourrait améliorer le flux sanguin et réduire la fatigue musculaire

Une autre étude qui est une méta-analyse publiée en 2020 a évalué l'impact de la supplémentation en citrulline sur la perception de l'effort, les douleurs musculaires post-exercice et les niveaux de lactate sanguin. Cette revue systématique a inclus 13 essais contrôlés randomisés, totalisant 206 participants en bonne santé, qui ont consommé du malate de citrulline (8g) dans les deux heures précédant l'exercice (exercices de résistance et d'endurance). La supplémentation en citrulline semble avoir atténué la perception de l'effort et les douleurs musculaires dans les 24 heures suivant l'exercice, sans influencer les niveaux de lactate sanguin. Ces résultats suggèrent que la citrulline pourrait être bénéfique pour la récupération musculaire à court terme. (113)

Toutefois, d'autres travaux remettent en question l'efficacité de la citrulline. Une revue de la littérature a montré que, si certaines études rapportent une amélioration de la performance et de la récupération, d'autres ne trouvent pas d'effets significatifs, soulignant l'influence de paramètres comme le type d'exercice et les dosages utilisés (114).

De plus, une méta-analyse portant sur plusieurs études a conclu que la supplémentation en citrulline n'améliorait pas significativement la performance aérobie, le  $VO_2$  max ou le taux de lactate, indiquant que son efficacité pourrait être limitée dans ce type d'effort (115).

Ainsi, bien que la citrulline offre un potentiel prometteur pour améliorer la performance sportive, en particulier grâce à son rôle dans la production d'oxyde nitrique et la vasodilatation, les résultats des études restent partagés. Il est donc nécessaire de mener davantage de recherches pour déterminer les conditions idéales d'utilisation et identifier les types d'athlètes qui pourraient en bénéficier pleinement.

En ce qui concerne la sécurité de la supplémentation en citrulline, elle est généralement bien tolérée et ne cause pas d'effets délétères majeurs chez la plupart des individus. Cependant, il est conseillé aux personnes ayant des conditions médicales spécifiques, telles que les troubles du métabolisme de l'urée (comme la citrullinémie) ou l'insuffisance rénale chronique, ainsi qu'à celles envisageant une supplémentation à long terme, de consulter un professionnel de santé avant de commencer les cures.

## **V. Conclusion**

Le sport et plus particulièrement la musculation sont aujourd'hui des pratiques largement répandus, répondant à des objectifs variés allant de la performance sportive à l'amélioration de la condition physique et de l'apparence corporelle. Dans ce contexte, le recours aux compléments alimentaires est devenu courant, voire systématique, chez de nombreux pratiquants, qu'ils soient amateurs ou professionnels. Ces produits promettent des gains en performance, une meilleure récupération et une optimisation du développement musculaire.

Toutefois, l'efficacité réelle de ces compléments dépend de nombreux facteurs : la qualité des ingrédients, les doses utilisées, le moment de la prise, l'alimentation globale de l'individu, mais aussi ses caractéristiques physiologiques et son mode d'entraînement. Certains compléments, tels que la créatine ou les protéines de lactosérum, ont démontré une efficacité bien documentée dans la littérature scientifique. D'autres, comme les BCAA, le collagène ou la citrulline, présentent des résultats plus mitigés, avec des bénéfices souvent limités à des contextes spécifiques ou des populations ciblées.

La sécurité d'emploi des compléments alimentaires reste une préoccupation centrale, en particulier dans un contexte où leur accès est facile et leur consommation souvent réalisée sans connaissance ou information suffisante. Si la plupart des compléments alimentaires sont bien tolérés dans les conditions d'usage recommandées, leur consommation excessive, inappropriée ou combinée à d'autres substances peut entraîner des effets indésirables, parfois graves.

Le pharmacien, en tant qu'acteur de premier recours, joue un rôle stratégique dans la sécurisation de l'usage des compléments alimentaires, notamment en informant, en orientant, et en participant activement à la déclaration des effets indésirables via la nutrivigilance.

Ainsi, les compléments alimentaires peuvent représenter un soutien utile dans le développement musculaire, à condition d'être utilisés de manière raisonnée et encadrée. Ils ne doivent en aucun cas remplacer une alimentation équilibrée, un entraînement cohérent, ni un suivi de santé approprié.

## Bibliographie

1. Andrea. NHA Naturolistique. 2018 [cité 14 oct 2024]. Les muscles lisses ou muscles viscéraux - Les muscles de nos organes. Disponible sur: <https://naturolistique.fr/muscles-lisses-muscles-visceraux/>
2. Bouriche MT. Place des compléments alimentaires et des conseils hygiéno-diététiques chez les pratiquants de sport en salle.
3. Anatomie du système locomoteur (myologie) [Internet]. [cité 14 oct 2024]. Disponible sur: <http://recap-ide.blogspot.com/2016/10/anatomie-systeme-locomoteur-myologie.html>
4. Kenhub [Internet]. [cité 14 oct 2024]. Système musculosquelettique. Disponible sur: <https://www.kenhub.com/fr/library/anatomie/systeme-musculosquelettique>
5. Biology LibreTexts [Internet]. 2018 [cité 14 oct 2024]. 15.4: Muscle Contraction. Disponible sur: [https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Human\\_Biology/Human\\_Biology\\_\(Wakim\\_and\\_Grewal\)/15%3A\\_Muscular\\_System/15.4%3A\\_Muscle\\_Contraction](https://bio.libretexts.org/Bookshelves/Human_Biology/Human_Biology_(Wakim_and_Grewal)/15%3A_Muscular_System/15.4%3A_Muscle_Contraction)
6. Comprendre et enseigner les sciences naturelles [Internet]. 2023 [cité 14 oct 2024]. Chapitre 6/ La cellule musculaire, une structure dédiée à la contraction. Disponible sur: <https://innoverensvt.org/2023/11/06/chapitre-5-la-cellule-musculaire-une-structure-specialisee/>
7. La consommation de la matière or [Internet]. [cité 14 oct 2024]. Disponible sur: <http://www.khayma.com/svtfat/bacinterenerg9.htm>
8. IRBMS [Internet]. 2014 [cité 17 oct 2024]. Les différentes filières énergétiques. Disponible sur: <https://www.irbms.com/filieres-energetiques/>
9. Préparation Physique Football [Internet]. [cité 17 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.preparationphysiquefootball.com/201707/PMA-VMA-filieres-energetiques-acide-lactique-Explications.php>
10. Isoenzymes are Special Proteins with Catalytic activity Why? [Internet]. 2014 [cité 17 oct 2024]. Disponible sur: <https://golifescience.com/isoenzymes/>
11. Baker JS, McCormick MC, Robergs RA. Interaction among Skeletal Muscle Metabolic Energy Systems during Intense Exercise. *J Nutr Metab.* 2010;2010:905612.
12. Respiration anaérobie - Labster [Internet]. [cité 30 oct 2024]. Disponible sur: <https://theory.labster.com/fr/anaerobic-respiration/>
13. Que sait-on sur le lactate en 2020 ? – La médecine du sport [Internet]. [cité 30 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.lamedecinedusport.com/que-sait-on-sur-le-lactate-en-2020/>
14. v21\_39. LES GLUCIDES [Internet]. VITAL RETOUR AUX SOURCES. 2020 [cité 30 oct 2024]. Disponible sur: <https://vitalretourauxsources.fr/les-glucides>

15. SIMON M. Cours Pharmacie. 2009 [cité 30 oct 2024]. Chaîne respiratoire et phosphorylation oxydative. Disponible sur: <https://www.cours-pharmacie.com/biochimie/chaine-respiratoire-et-phosphorylation-oxydative.html>
16. Nadaj-Pakleza A. Hypertrophie musculaire : signe de bonne santé ou de maladie ? Cah Myol. 1 juill 2022;(25):10-5.
17. de Freitas MC, Gerosa-Neto J, Zanchi NE, Lira FS, Rossi FE. Role of metabolic stress for enhancing muscle adaptations: Practical applications. World J Methodol. 26 juin 2017;7(2):46-54.
18. CEPSUM [Internet]. 2023 [cité 8 nov 2024]. Comprendre l'hypertrophie musculaire. Disponible sur: <https://www.cepsum.umontreal.ca/2023/09/27/lhypertrophie-musculaire/>
19. Drummond MJ, Fry CS, Glynn EL, Dreyer HC, Dhanani S, Timmerman KL, et al. Rapamycin administration in humans blocks the contraction-induced increase in skeletal muscle protein synthesis. J Physiol. 1 avr 2009;587(Pt 7):1535-46.
20. Gatorade Sports Science Institute [Internet]. [cité 7 févr 2025]. SSE #123: Alimentation et réponse moléculaire à un entraînement de force. Disponible sur: <http://www.gssiweb.org:80/fr-ca/article/sse-123-alimentation-et-r%C3%A9ponse-mol%C3%A9culaire-%C3%A0-un-entra%C3%AEnement-de-force>
21. Churchward-Venne TA, Burd NA, Mitchell CJ, West DWD, Philp A, Marcotte GR, et al. Supplementation of a suboptimal protein dose with leucine or essential amino acids: effects on myofibrillar protein synthesis at rest and following resistance exercise in men. J Physiol. 1 juin 2012;590(11):2751-65.
22. Gatorade Sports Science Institute [Internet]. [cité 15 nov 2024]. SSE #123: Alimentation et réponse moléculaire à un entraînement de force. Disponible sur: <http://www.gssiweb.org:80/fr-ca/article/sse-123-alimentation-et-r%C3%A9ponse-mol%C3%A9culaire-%C3%A0-un-entra%C3%AEnement-de-force>
23. Nutri&Co [Internet]. [cité 8 nov 2024]. Hypertrophie musculaire : rôle, fonctionnement et optimisation. Disponible sur: <https://nutriandco.com/fr/pages/hypertrophie-musculaire>
24. Kaczmarek A, Kaczmarek M, Ciałowicz M, Clemente FM, Wolański P, Badicu G, et al. The Role of Satellite Cells in Skeletal Muscle Regeneration—The Effect of Exercise and Age. Biology. 18 oct 2021;10(10):1056.
25. Schoenfeld BJ. The Mechanisms of Muscle Hypertrophy and Their Application to Resistance Training. J Strength Cond Res. oct 2010;24(10):2857.
26. The Journal of Strength & Conditioning Research [Internet]. [cité 8 nov 2024]. Disponible sur: [https://journals.lww.com/nsca-jscr/fulltext/2009/01000/the\\_effect\\_of\\_resistive\\_exercise\\_rest\\_interval\\_on.11.aspx](https://journals.lww.com/nsca-jscr/fulltext/2009/01000/the_effect_of_resistive_exercise_rest_interval_on.11.aspx)
27. Lasevicius T, Schoenfeld BJ, Silva-Batista C, Barros T de S, Aihara AY, Brendon H, et al. Muscle Failure Promotes Greater Muscle Hypertrophy in Low-Load but Not in High-Load Resistance Training. J Strength Cond Res. 1 févr 2022;36(2):346-51.

28. Burd NA, West DWD, Staples AW, Atherton PJ, Baker JM, Moore DR, et al. Low-load high volume resistance exercise stimulates muscle protein synthesis more than high-load low volume resistance exercise in young men. *PLoS One*. 9 août 2010;5(8):e12033.
29. Dobson N. The Effect of Low-Load Resistance Training on Skeletal Muscle Hypertrophy in Trained Men: A Critically Appraised Topic. *J Sport Rehabil*. 1 janv 2022;31(1):99-104.
30. Acide aminé. In: Wikipédia [Internet]. 2024 [cité 7 févr 2025]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Acide\\_amin%C3%A9&oldid=219023951](https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Acide_amin%C3%A9&oldid=219023951)
31. NUT-Ra-Proteines.pdf [Internet]. [cité 7 févr 2025]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Proteines.pdf>
32. FICHE-AA.pdf [Internet]. [cité 7 févr 2025]. Disponible sur: <https://www.mdep.fr/wp-content/uploads/2020/09/FICHE-AA.pdf>
33. Rabot A. Laboratoires NHCO Nutrition. 2022 [cité 9 févr 2025]. Les acides aminés, des créateurs de protéines | NHCO. Disponible sur: <https://nhco-nutrition.com/journal/les-acides-amines-des-createurs-de-proteines/>
34. Les protéines en questions | INRAE [Internet]. [cité 9 févr 2025]. Disponible sur: <https://www.inrae.fr/alimentation-sante-globale/prot%C3%A9ines-questions>
35. Connaître la qualité d'une protéine grâce au PDCAAS [Internet]. 2023 [cité 9 févr 2025]. Disponible sur: <https://www.dynveo.fr/blog/pdcaas-n73>
36. Protein digestibility corrected amino acid score. In: Wikipedia [Internet]. 2024 [cité 9 févr 2025]. Disponible sur: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Protein\\_digestibility\\_corrected\\_amino\\_acid\\_score&oldid=1242598980](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Protein_digestibility_corrected_amino_acid_score&oldid=1242598980)
37. Les anti-nutriments sont-ils nocifs ? - La source de nutrition [Internet]. 2019 [cité 9 févr 2025]. Disponible sur: <https://nutritionsource.hsph.harvard.edu/anti-nutrients/>
38. sport AA Kinésithérapeute et Ostéopathe du. Anti nutriments : définition et stratégies pour les réduire de vos aliments [Internet]. Tout pour ma santé. 2021 [cité 9 févr 2025]. Disponible sur: <https://toutpourmasante.fr/anti-nutriments-aliments/>
39. Qualiment. Digestibilité des protéines, biodisponibilité des acides aminés: comment les mesurer et maîtriser leurs facteurs de variation ? • Carnot Qualiment [Internet]. Carnot Qualiment. 2020 [cité 9 févr 2025]. Disponible sur: <https://qualiment.fr/digestibilite-des-proteines-biodisponibilite-des-acides-amines-comment-les-mesurer-et-maitriser-leurs-facteurs-de-variation/hot-topics/>
40. Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. 2013 [cité 9 févr 2025]. Les protéines. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/les-proteines>
41. Celuga.fr. Mieux comprendre l'index (ou indice) glycémique [Internet]. [cité 10 févr 2025]. Disponible sur: <https://www.cultures-sucre.com/sucre-et-alimentation/indice-glycemique-ou-index-glycemique/>

42. Qu'est-ce que l'index glycémique ? [Internet]. FFC. 2016 [cité 10 févr 2025]. Disponible sur: <https://www.fedecardio.org/je-m-informe/qu-est-ce-que-l-index-glycemique/>
43. indices-glycemiques.pdf [Internet]. [cité 10 févr 2025]. Disponible sur: [https://www.elveapharma.com/wp-content/uploads/2017/02/indices-glycemiques.pdf?utm\\_source](https://www.elveapharma.com/wp-content/uploads/2017/02/indices-glycemiques.pdf?utm_source)
44. Monro JA, Shaw M. Glycemic impact, glycemic glucose equivalents, glycemic index, and glycemic load: definitions, distinctions, and implications. *Am J Clin Nutr.* janv 2008;87(1):237S-243S.
45. Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. 2021 [cité 16 févr 2025]. Les lipides. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/les-lipides>
46. VIDAL [Internet]. [cité 16 févr 2025]. Les acides gras saturés, insaturés et trans. Disponible sur: <https://www.vidal.fr/sante/nutrition/corps-aliments/lipides-energie/acides-gras-satures-insatures-trans.html>
47. SERONS-NOUS IMMORTELS ? - 2 Résumé et avis [Internet]. 2009 [cité 16 févr 2025]. Disponible sur: <https://des-livres-pour-changer-de-vie.com/serons-nous-immortels-2/>, <https://des-livres-pour-changer-de-vie.com/serons-nous-immortels-2/>
48. Zivkovic AM, Telis N, German JB, Hammock BD. Dietary omega-3 fatty acids aid in the modulation of inflammation and metabolic health. *Calif Agric.* 2011;65(3):106-11.
49. symposium-dernieres-recommandations-lipides-theorie-assiette.pdf [Internet]. [cité 16 févr 2025]. Disponible sur: <https://www.cerin.org/wp-content/uploads/2017/01/symposium-dernieres-recommandations-lipides-theorie-assiette.pdf>
50. VIDAL [Internet]. [cité 17 févr 2025]. Mieux comprendre le monde des vitamines. Disponible sur: <https://www.vidal.fr/actualites/29938-mieux-comprendre-le-monde-des-vitamines.html>
51. Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. 2021 [cité 17 févr 2025]. Les références nutritionnelles en vitamines et minéraux. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/les-references-nutritionnelles-en-vitamines-et-mineraux>
52. Les nutriments, essentiels pour une bonne santé ! (1ère partie) | Dictionnaire Visuel [Internet]. [cité 17 févr 2025]. Disponible sur: [https://ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/static/qc/nutriments\\_1](https://ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/static/qc/nutriments_1)
53. Stockton KA, Mengersen K, Paratz JD, Kandiah D, Bennell KL. Effect of vitamin D supplementation on muscle strength: a systematic review and meta-analysis. *Osteoporos Int J Establ Result Coop Eur Found Osteoporos Natl Osteoporos Found USA.* mars 2011;22(3):859-71.
54. Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. 2021 [cité 23 févr 2025]. Les références nutritionnelles en vitamines et

- minéraux. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/les-references-nutritionnelles-en-vitamines-et-mineraux>
55. Linus Pauling Institute [Internet]. 2014 [cité 23 févr 2025]. Supplemental Forms. Disponible sur: <https://lpi.oregonstate.edu/mic/vitamins/vitamin-C/supplemental-forms>
  56. 6 formes différentes de vitamine C et comment les utiliser [Internet]. [cité 23 févr 2025]. Disponible sur: <https://fr.iherb.com/blog/vitamin-c-forms/994>
  57. VIDAL [Internet]. [cité 23 févr 2025]. Vitamine C - Complément alimentaire. Disponible sur: <https://www. Vidal.fr/parapharmacie/complements-alimentaires/vitamine-c-acide-ascorbique.html>
  58. Volpe SL. Magnesium and the Athlete. *Curr Sports Med Rep*. 2015;14(4):279-83.
  59. Establier E. Laboratoires NHCO Nutrition. 2023 [cité 24 févr 2025]. Les 9 signes d'un manque de magnésium | NHCO. Disponible sur: <https://nhco-nutrition.com/journal/les-9-signes-manque-magnesium/>
  60. Quel magnésium choisir [Internet]. [cité 24 févr 2025]. Disponible sur: <https://www.lanutrition.fr/bien-dans-sa-sante/les-complements-alimentaires/les-principaux-complements-alimentaires/les-complements-correcteurs-de-l-alimentation/le-magnesium/quel-magnesium-choisir>
  61. Zinc : Rôle, Références Nutritionnelles, Sources & Apports [Internet]. [cité 2 mars 2025]. Disponible sur: [https://www.pileje.fr/revue-sante/definition-zinc?utm\\_source](https://www.pileje.fr/revue-sante/definition-zinc?utm_source)
  62. Fallah A, Mohammad-Hasani A, Colagar AH. Zinc is an Essential Element for Male Fertility: A Review of Zn Roles in Men's Health, Germination, Sperm Quality, and Fertilization. *J Reprod Infertil*. 2018;19(2):69-81.
  63. Te L, Liu J, Ma J, Wang S. Correlation between serum zinc and testosterone: A systematic review. *J Trace Elem Med Biol Organ Soc Miner Trace Elem*. mars 2023;76:127124.
  64. Porto LGG, Soares EMKVK, Ranadive SM, Lofrano-Porto A, Smith DL. Association of Endogenous Testosterone with Physical Fitness Measures during Firefighter Occupational Health Evaluations. *Int J Environ Res Public Health*. mars 2024;21(3):274.
  65. Rasmussen RS, Midttun M, Zerahn B, Pedersen M, Rashid A, Østergren PB, et al. Testosterone and resistance training improved physical performance and reduced fatigue in frail older men: 1 year follow-up of a randomized clinical trial. *Aging Male Off J Int Soc Study Aging Male*. déc 2024;27(1):2403519.
  66. Vingren JL, Kraemer WJ, Ratamess NA, Anderson JM, Volek JS, Maresh CM. Testosterone physiology in resistance exercise and training: the up-stream regulatory elements. *Sports Med Auckl NZ*. 1 déc 2010;40(12):1037-53.
  67. Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. 2025 [cité 2 mars 2025]. Les références nutritionnelles en vitamines et minéraux. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/les-references-nutritionnelles-en-vitamines-et-mineraux>

68. Protéalpes - Whey Sans Additifs & 100% Made In en France [Internet]. 2021 [cité 1 oct 2024]. Disponible sur: <https://protealpes.com/>
69. Comment est fabriqué la whey protéine ? - SuperPhysique [Internet]. [cité 1 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.superphysique.org/nutrition/content/30-nutrition-et-supplements-guide-complet-superphysique-sur-la-fabrication-de-la-whey>
70. Genetic Nutrition [Internet]. 2024 [cité 13 nov 2024]. How Whey Protein Is Made: From Milk to Powder. Disponible sur: <https://www.geneticnutrition.in/blogs/genetic-life/how-whey-protein-is-made-from-milk-to-powder>
71. Calderon A. Fitnition - Blog Musculation, Fitness et Nutrition. 2018 [cité 1 oct 2024]. Fabrication Whey Protéine : Comment est fabriqué la Protéine en Poudre ? Disponible sur: <https://www.fitnition.fr/index.php/2018/02/11/fabrication-whey-proteine-en-poudre/>
72. Davies RW, Carson BP, Jakeman PM. The Effect of Whey Protein Supplementation on the Temporal Recovery of Muscle Function Following Resistance Training: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*. 16 févr 2018;10(2):221.
73. Morton RW, Murphy KT, McKellar SR, Schoenfeld BJ, Henselmans M, Helms E, et al. A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. *Br J Sports Med*. mars 2018;52(6):376-84.
74. Hamarsland H, Nordengen AL, Nyvik Aas S, Holte K, Garthe I, Paulsen G, et al. Native whey protein with high levels of leucine results in similar post-exercise muscular anabolic responses as regular whey protein: a randomized controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr*. 21 nov 2017;14:43.
75. Churchward-Venne TA, Breen L, Di Donato DM, Hector AJ, Mitchell CJ, Moore DR, et al. Leucine supplementation of a low-protein mixed macronutrient beverage enhances myofibrillar protein synthesis in young men: a double-blind, randomized trial. *Am J Clin Nutr*. févr 2014;99(2):276-86.
76. #123 : Donald Layman, PhD – Cinétique de la leucine, activation de mTOR et réponse anabolique aux protéines | Sigma Nutrition [Internet]. [cité 13 nov 2024]. Disponible sur: <https://sigmanutrition.com/episode123/>
77. Vasconcelos QDJS, Bachur TPR, Aragão GF. Whey protein supplementation and its potentially adverse effects on health: a systematic review. *Appl Physiol Nutr Metab Physiol Appl Nutr Metab*. janv 2021;46(1):27-33.
78. Kreider RB, Kalman DS, Antonio J, Ziegenfuss TN, Wildman R, Collins R, et al. International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine. *J Int Soc Sports Nutr*. 13 juin 2017;14:18.
79. Antonio J, Candow DG, Forbes SC, Gualano B, Jagim AR, Kreider RB, et al. Common questions and misconceptions about creatine supplementation: what does the scientific evidence really show? *J Int Soc Sports Nutr*. 8 févr 2021;18:13.
80. Trotier-Faurion A. Optimisation pharmacologique des dérivés de la créatine pour le traitement du déficit en transporteur de la créatine.

81. Green AL, Hultman E, Macdonald IA, Sewell DA, Greenhaff PL. Carbohydrate ingestion augments skeletal muscle creatine accumulation during creatine supplementation in humans. *Am J Physiol.* nov 1996;271(5 Pt 1):E821-826.
82. 963469911\_orig.jpg (1280×458) [Internet]. [cité 1 oct 2024]. Disponible sur: [https://aurametrix.weebly.com/uploads/5/7/1/7/57177541/963469911\\_orig.jpg](https://aurametrix.weebly.com/uploads/5/7/1/7/57177541/963469911_orig.jpg)
83. Wallimann T, Tokarska-Schlattner M, Schlattner U. The creatine kinase system and pleiotropic effects of creatine. *Amino Acids.* mai 2011;40(5):1271-96.
84. Cooke MB, Rybalka E, Williams AD, Cribb PJ, Hayes A. Creatine supplementation enhances muscle force recovery after eccentrically-induced muscle damage in healthy individuals. *J Int Soc Sports Nutr.* 2 juin 2009;6:13.
85. Santos RVT, Bassit RA, Caperuto EC, Costa Rosa LFBP. The effect of creatine supplementation upon inflammatory and muscle soreness markers after a 30km race. *Life Sci.* 3 sept 2004;75(16):1917-24.
86. Volek JS, Ratamess NA, Rubin MR, Gómez AL, French DN, McGuigan MM, et al. The effects of creatine supplementation on muscular performance and body composition responses to short-term resistance training overreaching. *Eur J Appl Physiol.* mai 2004;91(5-6):628-37.
87. Antonio J, Candow DG, Forbes SC, Gualano B, Jagim AR, Kreider RB, et al. Common questions and misconceptions about creatine supplementation: what does the scientific evidence really show? *J Int Soc Sports Nutr.* 8 févr 2021;18:13.
88. Andre TL. Effects of five weeks of resistance training and relatively-dosed creatine monohydrate supplementation on body composition and muscle strength, and whole-body creatine metabolism in resistance-trained males. 2016.
89. Rawson ES, Stec MJ, Frederickson SJ, Miles MP. Low-dose creatine supplementation enhances fatigue resistance in the absence of weight gain. *Nutrition.* 1 avr 2011;27(4):451-5.
90. Spillane M, Schoch R, Cooke M, Harvey T, Greenwood M, Kreider R, et al. The effects of creatine ethyl ester supplementation combined with heavy resistance training on body composition, muscle performance, and serum and muscle creatine levels. *J Int Soc Sports Nutr.* 19 févr 2009;6:6.
91. Wu SH, Chen KL, Hsu C, Chen HC, Chen JY, Yu SY, et al. Creatine Supplementation for Muscle Growth: A Scoping Review of Randomized Clinical Trials from 2012 to 2021. *Nutrients.* 16 mars 2022;14(6):1255.
92. sports.gouv.fr [Internet]. [cité 16 févr 2025]. Lutte contre le trafic. Disponible sur: <https://www.sports.gouv.fr/lutte-contre-le-traffic-89>
93. VIDAL [Internet]. [cité 16 févr 2025]. Créatine - Complément alimentaire. Disponible sur: <https://www.vidal.fr/parapharmacie/complements-alimentaires/creatine.html>
94. Silva A de S e, Pertille A, Barbosa CGR, Silva JA de O, Jesus DV de, Ribeiro AGSV, et al. Effects of Creatine Supplementation on Renal Function: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Ren Nutr.* 1 nov 2019;29(6):480-9.

95. Hultman E, Soderlund K, Timmons JA, Cederblad G, Greenhaff PL. Muscle creatine loading in men. *J Appl Physiol*. juill 1996;81(1):232-7.
96. Trüeb RM. Molecular mechanisms of androgenetic alopecia. *Exp Gerontol*. 2002;37(8-9):981-90.
97. van der Merwe J, Brooks NE, Myburgh KH. Three weeks of creatine monohydrate supplementation affects dihydrotestosterone to testosterone ratio in college-aged rugby players. *Clin J Sport Med Off J Can Acad Sport Med*. sept 2009;19(5):399-404.
98. Lak M, Forbes SC, Ashtary-Larky D, Dadkhahfar S, Robati RM, Nezakati F, et al. Does creatine cause hair loss? A 12-week randomized controlled trial. *J Int Soc Sports Nutr*. 22(Suppl 1):2495229.
99. Fuchs CJ, Hermans WJH, Holwerda AM, Smeets JSJ, Senden JM, van Kranenburg J, et al. Branched-chain amino acid and branched-chain ketoacid ingestion increases muscle protein synthesis rates in vivo in older adults: a double-blind, randomized trial. *Am J Clin Nutr*. 1 oct 2019;110(4):862-72.
100. Kaspy MS, Hannaian SJ, Bell ZW, Churchward-Venne TA. The effects of branched-chain amino acids on muscle protein synthesis, muscle protein breakdown and associated molecular signalling responses in humans: an update. *Nutr Res Rev*. déc 2024;37(2):273-86.
101. Quels sont les meilleurs acides aminés en musculation, BCAA ou EAA? [Internet]. 2020 [cité 10 oct 2024]. Disponible sur: <https://www.fitadium.com/conseils/bcaa-aaa-meilleur-supplement-acide-amine/>
102. Collagène. In: Wikipédia [Internet]. 2025 [cité 21 mars 2025]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Collag%C3%A8ne&oldid=222566500>
103. Courte M. Comparaison du collagène marin avec d'autres types de collagène [Internet]. Greenweez magazine. 2024 [cité 21 mars 2025]. Disponible sur: <https://www.greenweez.com/magazine/comparaison-du-collagene-marin-avec-dautres-types-de-collagene-47069/>
104. 9.32 Fonctions enzymatiques | Nutrition Flexbook [Internet]. [cité 24 mars 2025]. Disponible sur: [https://courses.lumenlearning.com/suny-nutrition/chapter/9-32-enzymatic-functions/?utm\\_source](https://courses.lumenlearning.com/suny-nutrition/chapter/9-32-enzymatic-functions/?utm_source)
105. Clark KL, Sebastianelli W, Flechsenhar KR, Aukermann DF, Meza F, Millard RL, et al. 24-Week study on the use of collagen hydrolysate as a dietary supplement in athletes with activity-related joint pain. *Curr Med Res Opin*. mai 2008;24(5):1485-96.
106. Zdzieblik D, Oesser S, Gollhofer A, König D. Improvement of activity-related knee joint discomfort following supplementation of specific collagen peptides. *Appl Physiol Nutr Metab*. juin 2017;42(6):588-95.
107. Le collagène pour soulager les douleurs, vraiment? [Internet]. Salle de presse de l'Inserm. [cité 1 mai 2025]. Disponible sur: <https://presse.inserm.fr/canal-detox/le-collagene-pour-soulager-les-douleurs-vraiment/>

108. Khatri M, Naughton RJ, Clifford T, Harper LD, Corr L. The effects of collagen peptide supplementation on body composition, collagen synthesis, and recovery from joint injury and exercise: a systematic review. *Amino Acids*. oct 2021;53(10):1493-506.
109. Arginase - un aperçu | Sujets de ScienceDirect [Internet]. [cité 28 mars 2025]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/arginase>
110. Bahadoran Z, Mirmiran P, Kashfi K, Ghasemi A. Endogenous flux of nitric oxide: Citrulline is preferred to Arginine. *Acta Physiol Oxf Engl*. mars 2021;231(3):e13572.
111. Gentilin A, Zanini P, Cevese A, Schena F, Tarperi C. Ergogenic effects of citrulline supplementation on exercise performance and physiological indexes of exercise performance during cycling tests: A review. *Sci Sports*. 1 déc 2022;37(8):665-74.
112. Suzuki T, Morita M, Kobayashi Y, Kamimura A. Oral L-citrulline supplementation enhances cycling time trial performance in healthy trained men: Double-blind randomized placebo-controlled 2-way crossover study. *J Int Soc Sports Nutr*. 2016;13:6.
113. Rhim HC, Kim SJ, Park J, Jang KM. Effect of citrulline on post-exercise rating of perceived exertion, muscle soreness, and blood lactate levels: A systematic review and meta-analysis. *J Sport Health Sci*. 1 déc 2020;9(6):553-61.
114. Gonzalez AM, Trexler ET. Effects of Citrulline Supplementation on Exercise Performance in Humans: A Review of the Current Literature. *J Strength Cond Res*. mai 2020;34(5):1480-95.
115. Viribay A, Fernández-Landa J, Castañeda-Babarro A, Collado PS, Fernández-Lázaro D, Mielgo-Ayuso J. Effects of Citrulline Supplementation on Different Aerobic Exercise Performance Outcomes: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients*. 24 août 2022;14(17):3479.