

**UNIVERSITE TOULOUSE III PAUL SABATIER
FACULTE DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES**

ANNEE : 2022

THESE 2022/TOU3/2012

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

Présentée et soutenue publiquement
par

Armand REBERGA

**Aliments diététiques de l'effort à base de protéines de
lait et le conseil officinal.**

Date de soutenance
le 14/03/2022

Directeur de thèse : Dr Cendrine CABOU

JURY

Président : Pr Florence TABOULET
1er assesseur : Dr Cendrine CABOU
2ème assesseur : Dr Olivier DELCAIRE
3ème assesseur : Dr Charles AURIOL

PERSONNEL ENSEIGNANT
de la Faculté des Sciences Pharmaceutiques de l'Université Paul Sabatier
au 1er octobre 2020

Professeurs Emérites

Mme BARRE A.	Biologie Cellulaire
M. BENOIST H.	Immunologie
M. BERNADOU J.	Chimie Thérapeutique
M. CAMPISTRON G.	Physiologie
M. GAIRIN J.E.	Pharmacologie
Mme NEPVEU F.	Chimie analytique
M. ROUGE P.	Biologie Cellulaire
M. SALLES B.	Toxicologie

Professeurs des Universités

Hospitalo-Universitaires

Mme AYYOUB M.	Immunologie
M. CESTAC P.	Pharmacie Clinique
M. CHATELUT E.	Pharmacologie
Mme DE MAS MANSAT V.	Hématologie
M. FAVRE G.	Biochimie
Mme GANDIA P.	Pharmacologie
M. PARINI A.	Physiologie
M. PASQUIER C. (Doyen)	Bactériologie - Virologie
Mme ROQUES C.	Bactériologie - Virologie
Mme ROUSSIN A.	Pharmacologie
Mme SALLERIN B.	Pharmacie Clinique
M. VALENTIN A.	Parasitologie

Universitaires

Mme BERNARDES-GÉNISSON V.	Chimie thérapeutique
Mme BOUTET E.	Toxicologie - Sémiologie
Mme COUDERC B.	Biochimie
M. CUSSAC D. (Vice-Doyen)	Physiologie
M. FABRE N.	Pharmacognosie
Mme GIROD-FULLANA S.	Pharmacie Galénique
M. GUIARD B.	Pharmacologie
M. LETISSE F.	Chimie pharmaceutique
Mme MULLER-STAU MONT C.	Toxicologie - Sémiologie
Mme REYBIER-VUATTOUX K.	Chimie analytique
M. SEGUI B.	Biologie Cellulaire
Mme SIXOU S.	Biochimie
M. SOUCHARD J-P.	Chimie analytique
Mme TABOULET F.	Droit Pharmaceutique
M. VERHAEGHE P.	Chimie Thérapeutique

Maîtres de Conférences des Universités

Hospitalo-Universitaires

M. DELCOURT N.	Biochimie
Mme JUILLARD-CONDAT B.	Droit Pharmaceutique
M. PUISSET F.	Pharmacie Clinique
Mme ROUCH L.	Pharmacie Clinique
Mme ROUZAUD-LABORDE C.	Pharmacie Clinique
Mme SERONIE-VIVIEN S (*)	Biochimie
Mme THOMAS F. (*)	Pharmacologie

Universitaires

Mme ARELLANO C. (*)	Chimie Thérapeutique
Mme AUTHIER H.	Parasitologie
M. BERGE M. (*)	Bactériologie - Virologie
Mme BON C. (*)	Biophysique
M. BOUJILA J. (*)	Chimie analytique
M. BROUILLET F.	Pharmacie Galénique
Mme CABOU C.	Physiologie
Mme CAZALBOU S. (*)	Pharmacie Galénique
Mme CHAPUY-REGAUD S.	Bactériologie - Virologie
Mme COLACIOS C.	Immunologie
Mme COSTE A. (*)	Parasitologie
Mme DERA EVE C. (*)	Chimie Thérapeutique
Mme ECHINARD-DOUIN V.	Physiologie
Mme EL GARAH F.	Chimie Pharmaceutique
Mme EL HAGE S.	Chimie Pharmaceutique
Mme FALLONE F.	Toxicologie
Mme FERNANDEZ-VIDAL A.	Toxicologie
Mme GADEA A.	Pharmacognosie
Mme HALOVA-LAJOIE B.	Chimie Pharmaceutique
Mme JOUANJUS E.	Pharmacologie
Mme LAJOIE-MAZENC I.	Biochimie
Mme LEFEVRE L.	Physiologie
Mme LE LAMER A-C.	Pharmacognosie
M. LE NAOUR A.	Toxicologie
M. LEMARIE A.	Biochimie
M. MARTI G.	Pharmacognosie
Mme MONFERRAN S.	Biochimie
M. SAINTE-MARIE Y.	Physiologie
M. STIGLIANI J-L.	Chimie Pharmaceutique
M. SUDOR J. (*)	Chimie Analytique
Mme TERRISSE A-D.	Hématologie
Mme TOURRETTE-DIALLO A. (*)	Pharmacie Galénique
Mme VANSTEELANDT M.	Pharmacognosie
Mme WHITE-KONING M. (*)	Mathématiques

(*) Titulaire de l'habilitation à diriger des recherches (HDR)

Enseignants non titulaires

Assistants Hospitalo-Universitaires

Mme LARGEAUD L.	Immunologie
M. LE LOUEDEC F.	Pharmacologie
M. MOUMENI A.	Biochimie
M. PAGES A.	Pharmacie Clinique
Mme SALABERT A.S	Biophysique
Mme TRIBAUDEAU L.	Droit Pharmaceutique

Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)

M. François-Xavier TOUBLET	Chimie Thérapeutique
----------------------------	----------------------

SERMENT DE GALIEN

En présence des Maitres de la Faculté, je fais le serment :

- D'honorer ceux qui m'ont instruit(e) dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle aux principes qui m'ont été enseignés et d'actualiser mes connaissances.
- 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 Déontologie, de l'honneur, de la probité et du désintéressement ;
- De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers la personne humaine et sa dignité.
- En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.
- De ne dévoiler à personne les secrets qui m'auraient été confiés ou dont j'aurais eu connaissance dans l'exercice de ma profession
- De faire preuve de loyauté et de solidarité envers mes collègues pharmaciens
- De coopérer avec les autres professionnels de santé.

Que les Hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses. Que je sois couvert(e) d'opprobre et méprisé(e) de mes confrères si j'y manque.

Remerciements

Je remercie particulièrement Mme Cendrine CABOU, pour avoir accepté de suivre ce travail et pour m'avoir fait bénéficier de ses précieux conseils. Soyez assurée de ma sincère gratitude.

Ma vive reconnaissance va également à Mme Florence TABOULET qui préside ce jury et qui m'a soutenu durant ce travail. Soyez assurée de ma reconnaissance.

Je remercie également le Dr en pharmacie Charles AURIOL et le Dr en pharmacie Olivier DELCAIRE pour leurs présences et leurs sympathies à mon égard.

Je remercie également l'ensemble des participants présents.

Je remercie ma famille, mes parents ainsi que mon frère.

Mes meilleurs sentiments vont à celle qui, depuis le début de cette thèse, est présente à mes côtés et me supporte ma chérie Emmanuelle PEREGO.

Sommaire :

Liste des abréviations	9
Liste des tableaux	10
Liste des figures	11
Introduction	13
Partie 1 - Muscles, activité physique et besoins nutritionnels chez le sportif	15
A. Protéines et prise de masse musculaire chez le sportif	16
A.1. Physiologie de la contraction musculaire	16
A.1.1. Les tissus musculaires	16
A.1.2. Le muscle strié squelettique	16
A.1.3. Histologie du muscle strié squelettique	17
A.1.4. Jonction neuromusculaire	20
A.1.5. La contraction musculaire	21
A.1.6. Mécanisme moléculaire de la contraction musculaire	22
A.1.7. La relaxation	24
A.2. Physiologie de la prise de masse musculaire	24
A.3. Vieillesse musculaire	25
A.4. Protéines et besoins nutritionnels du sportif	26
A.4.1. Métabolisme protéique	26
A.4.1.1. Schéma général du métabolisme protéique chez l'homme	26
A.4.1.2. Paramètres cinétiques du métabolisme protéique	27
A.4.1.3. Renouvellement des protéines	27
A.4.1.4. Variation du renouvellement des protéines	27
A.4.2. Métabolisme protéique chez les sportifs	28
A.4.2.1. Métabolisme protéique chez le sportif d'endurance	28
A.4.2.2. Métabolisme protéique chez le sportif de force	31
A.4.2.3. Rôle des hormones dans la synthèse protéique	31
A.4.2.4. Notion de qualité d'une protéine alimentaire	32
A.4.3. Rôle des acides aminés branchés dans la performance et le développement musculaire	34
B. Nutriments et performance musculaire	37
B.1. Métabolisme énergétique musculaire et les filières énergétiques	37
B.1.1. Filière anaérobie alactique	38
B.1.2. Filière anaérobie lactique	38
B.1.3. Filière aérobie	40
B.2. Consommation maximale d'oxygène (VO ₂ max) et les filières énergétiques en fonction du type d'effort (endurance ou résistance)	44
B.2.1. Effort en exercice de force maximale	45
B.2.2. Effort en exercice de résistance	45
B.2.3. Effort en exercice d'endurance	46
B.2.4. Consommation maximale d'oxygène ou VO ₂ maxv	47
B.3. Références nutritionnelles en micronutriments établies par l'ANSES (2021)	48
B.3.1. Références nutritionnelles en vitamines	49
B.3.2. Références nutritionnelles en minéraux	50

B.4. Références nutritionnelles pour les besoins énergétiques	51
B.5. Références nutritionnelles en macronutriments énergétiques pour les hommes et les femmes adultes	51
B.6. Nutriments et performance musculaire	53
B.6.1. Les glucides	53
B.6.2. Les lipides	54
B.6.3. Les protéines	57
B.6.4. La créatine	58
B.6.5. La carnitine	60
B.6.6. La glutamine	61
B.6.7. La taurine	62
B.7. Références nutritionnelles du sportif d'endurance (glucides et lipides)	63
B.8. Références nutritionnelles du sportif de force (glucides et lipides)	65
Partie 2 - Aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait préparés sous forme de préparation en poudre pour boisson riche en protéines	66
A. Les aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait préparés sous forme de préparation en poudre pour boisson riche en protéine	67
A.1. Présentation	67
A.2. Les caséines	68
A.3. Le lactosérum	71
A.4. Exemples de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait présentes sur le marché français	73
B. Populations concernées	80
B.1. Habitude de consommation des sportifs	80
B.2. Etude quantitative de consommation des préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait (whey)	80
B.3. Etude du marché économique de la nutrition sportive	83
C. Indications et intérêts de la consommation des préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait	84
D. Effets indésirables	90
D.1. Effets indésirables attendus des préparations à base de lactosérum	90
D.1.1. Acné	90
D.1.2. Modification du microbiote et troubles intestinaux	92
D.1.3. Impact de la consommation sur la fonction rénale	93
D.1.4. Contaminations aux métaux lourds	94
D.2. Effets indésirables attendus des préparations contenant du lactosérum et de la caséine	95
D.2.1. Allergie et intolérance au lait de vache	95
D.2.2. Interactions médicamenteuses	96
D.2.3. Conséquences sur la densité osseuse	97
D.3. Effets indésirables inattendus et mésusages des aliments diététiques de l'effort issus du lait	100
E. Analyse personnelle des gammes de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait	100
Partie 3 - Réglementation	102
A. Définition des denrées alimentaires destinées aux sportifs	103

B. Information des consommateurs	103
B.1. Etiquetage et informations	103
B.2. Composition	104
B.3. Allégations	105
C. Nutrivigilance	106
D. Label AFNOR	108
 Partie 4 - Conseil officinal	 110
A. Responsabilité du pharmacien	111
B. Sélection des gammes et achats	112
C. Conseils et prise en charge du sportif lors d'une vente d'aliments diététiques de l'effort préparés en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait	112
C.1. Evaluation des besoins énergétiques	112
C.2. Informer le sportif des possibles effets indésirables et des risques d'interactions, contre-indication	117
C.3. Posologie et conditions de prise	118
D. Constat : diversification des aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait ..	120
 Conclusion	 123

Liste des abréviations :

CHO : Glucides.

BCAA : Acide aminé à chaîne latérale ramifiée.

CO₂ : Dioxyde de carbone

GH : Hormone de croissance.

IGF-1 : Somatomédine C, insulin-like growth factor-1.

CUD : Coefficient d'utilité digestive.

AA : Acides aminés.

AFSSA : Agence française de sécurité sanitaire des aliments.

ANSES : Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

BNM : Besoin nutritionnel moyen.

RNP : Référence nutritionnelle pour la population.

AS : Apport satisfaisant.

IR : Intervalles de référence.

LSS : Limites supérieures de sécurité.

AET : Apport énergétique total.

IG : Index glycémique.

LHS : Lipase hormono sensible.

AMPc : Adénosine monophosphate cyclique.

GMPc : Guanosine monophosphate cyclique.

INSEP : Institut national du sport, de l'expertise et de la performance.

ATP : Adénosine triphosphate.

LDL : Lipoprotéines de basse densité.

PDGF : Facteur de croissance dérivé des plaquettes.

TGF : Facteur de croissance transformant.

WHEY : Protéine de lactosérum.

1RM : Charge maximale sur une répétition.

FFM : Masse musculaire sèche.

DFG : Débit de filtration glomérulaire.

LNR : Laboratoire national de référence.

MB : Métabolisme de base.

MET : Equivalent métabolique.

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Liste des acides aminés protéinogènes.

Tableau 2 : Structure chimique de l'adénosine triphosphate (ATP) et l'adénosine diphosphate (ADP).

Tableau 3 : Récapitulatif des références nutritionnelles en vitamines pour les hommes adultes de 18 ans et plus.

Tableau 4 : Récapitulatif des références nutritionnelles en minéraux pour les hommes adultes.

Tableau 5 : Récapitulatif des références nutritionnelles en macronutriments énergétiques pour les hommes et les femmes adultes.

Tableau 6 : Proportion des différents acides gras dans l'alimentation selon l'ANSES.

Tableau 7 : Composition d'un lactosérum après extraction acide.

Tableau 8 : Les différentes protéines en poudre à base de protéines de lait du marché français.

Tableau 9 : Aliments ditététiques de l'effort à base de caséines.

Tableau 10 : Aliments diététiques de l'effort associant protéines de lactosérum, créatine, taurine.

Tableau 11 : Caractéristiques des participants (âge, sexe, Body Mass Index = Indice de Masse Corporelle).

Tableau 12 : Fréquence de consommation et type de produits destinés aux sportifs utilisés par les participants.

Tableau 13 : Représentation du nombre de lésions retrouvées chez les individus étudiés sur une durée totale de 2 mois.

Tableau 14 : Coûts énergétiques (en METS) en fonction de l'activité d'après Ainsworth et al. 2000 [66] modifié en 2011 la liste complète est disponible sur <https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/home> :

Liste des figures :

Figure 1 : Anatomie du muscle strié squelettique selon Marieb E.

Figure 2 : Structure et ultrastructure de la fibre musculaire (myocyte).

Figure 3 : Filament mince d'actine.

Figure 4 : Filament épais de myosine.

Figure 5 : La plaque motrice.

Figure 6 : Cycle de l'ATP dans la contraction musculaire.

Figure 7 : Métabolisme protéique chez l'homme.

Figure 8 : Conséquences de la baisse de la disponibilité en glucides (CHO) sur l'utilisation des composés azotés estimée par la perte d'urée par la sueur. D'après Lemon et Mullin, 1980.

Figure 9 : Dégradation de la leucine, isoleucine et valine. Ce sont des acides aminés à chaîne latérale ramifiée.

Figure 10 : Influence de la prise de glucose pendant l'exercice sur l'oxydation de la leucine d'après Davies et al., 1982.

Figure 11 : Régulation de la voie mTOR par les BCAA et influence sur la synthèse protéique.

Figure 12 : Réactions de la BCAT (Branched Chain Amino-Transferase) et de la BCKDC (Branched Chain Keto acids Dehydrogenase Complex) dans le catabolisme des BCAA au niveau des muscles et des tissus viscéraux.

Figure 13 : Glycolyse anaérobie lactique.

Figure 14 : Apport en ATP de la glycolyse aérobie et lipolyse.

Figure 15 : Cycle de Krebs.

Figure 16 : Acides aminés glucoformateurs (dans les carrés) et acides aminés cétoformateurs (dans les cercles) susceptibles de fournir de l'énergie dans la filière aérobie (par Tiré de Voet et Voet 1998).

Figure 17 : Courbe de Howald 1974. CP : filière anaérobie alactique (phosphocréatine). ATP : réserve d'ATP dans la cellule musculaire.

Figure 18 : Consommation maximale d'oxygène (VO_2 max) chez les pratiquants d'aviron Polonais en fonction de l'âge [94].

Figure 19 : La lipolyse adipocytaire d'après I. de Gliszinski.

Figure 20 : D'après Brooks et Mercier, le principal facteur influençant la lipolyse est l'intensité de l'exercice.

Figure 21 : Synthèse endogène de la créatine dans l'organisme à partir d'acides aminés.

Figure 22 : Déphosphorylation de la phosphocréatine.

Figure 23 : Mécanisme biochimique de la carnitine d'après E. Jaspard (2013, Université Angers/Biochimie).

Figure 24 : Métabolisme de la glutamine et cycle de l'urée.

Figure 25 : Structure chimique de la taurine.

Figure 26 : une micelle par Pieter Walstra. 1999. Modèles à sous-unités [32]. Calcium phosphate : ponts phosphocalciques.

Figure 27 : une micelle par le modèle « nanoclusters ». Horne et al. 1998.

Figure 28 : représentation de la structure à dualité des liens des caséines Horne et al. 1998.

Figure 29 : Graphique en forêt de la méta-analyse de Robert W. Morton et al. des résultats d'essais randomisés sur la IRM chez les sujets entraînés ou non.

Figure 30 : Graphique en forêt de la méta-analyse de Robert W. Morton et al. des résultats d'essais randomisés sur la FFM chez les sujets entraînés ou non.

Figure 31 : Méta-régression comparant des études en fonction de l'âge des participants et de l'influence de l'âge sur la FFM.

Figure 32 : Droite de régression linéaire qui met en lien la FFM en kg en fonction de l'apport total en protéines en g/kg/j.

Figure 33 : Droite de régression linéaire montrant le total du nombre de lésions apparaissant en fonction de la durée (G. Costa Fernandes Filho. 2013).

Figure 34 : Représentation de la charge rénale potentielle PRAL (Potential Renal Acid Load).

Figure 35 : Flux de synthèse protéiques musculaires (à l'issue d'un exercice de musculation) mesuré pendant 3 h après l'ingestion de 10 g d'acides aminés provenant de protéines de lactosérum, caséines ou de soja. Source : (Tang. JE. Moore DR. Et al. Ingestio, of whey hydrolysate, casein, or soy protein isolate : effets on mixed muscle protein synthesis at rest and following resistance exercise in young men. J. Appl. Physiol. 2009.)

Introduction :

Pourquoi pratique t-on le sport ?

Il existe deux principales raisons qui motivent les hommes et les femmes à la pratique du sport.

La première est d'abord liée à la performance. Le sport peut-être pratiqué dans le cadre d'une compétition réglementée (Football, Rugby...), ou seulement dans le but du dépassement de soi pour les sports pratiqués sans règlement sportif (Surf, Ski Freeride, Randonnée). Nombreuses sont les associations, les structures, permettant la pratique du sport des individus.

On pratique également le sport dans une visée thérapeutique, par exemple, pour la régulation du poids, de la glycémie ou de l'ostéoporose. Le bénéfice de la pratique du sport est également au niveau psychologique, puisqu'il permet par la libération d'endorphines une sensation de bien-être et permet de lutter contre le stress et l'anxiété. On peut noter aussi l'acquisition d'une plus grande confiance en soi et d'une meilleure image de soi-même. En effet, dans notre société occidentale, les critères de beauté physique sont fortement orientés vers des personnes ayant une apparence sportive ou musclée.

Ces raisons poussent donc les sportifs dans les salles de musculation, stades et autres structures permettant l'entraînement, l'accroissement des performances sportives et musculaires. On note ces dernières années, une explosion de la pratique de la musculation en salle (5,46 millions de Français sont inscrits dans une salle de sport d'après l'audit Europactive en 2016 [1]), de plus en plus de personnes pratiquent la musculation avec plus ou moins d'expérience pour des raisons toutes aussi variées. En plus de cette explosion de la démographie dans les salles de musculation, les aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait sont de plus en plus mis en avant sur le marché et leur consommation est devenue courante, les consommateurs sont motivés par l'espoir d'accroître les performances sportives et musculaires. Ces deux constatations m'ont poussé à la rédaction de cette thèse.

Dans le cadre d'une pratique sportive intense, la récupération et la construction musculaire sont conditionnées par l'alimentation. Les apports en macronutriments sont indispensables pour l'apport énergétique. Contrairement aux glucides et aux lipides, les protéines ne sont pas seulement qu'une forme de carburant pour notre corps. Ils jouent un rôle structurel (muscles, peau), et sont indispensables au bon fonctionnement du système

immunitaire et pour le transport de l'oxygène. C'est notamment le rôle des protéines alimentaires dans le renouvellement protéique et la construction musculaire qui nous intéresse dans cette thèse.

Le marché des aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait se développe considérablement. Nombreuses sont les structures qui vendent ces produits (sites internet, la grande distribution, magasins spécialisés, pharmacies). La promotion de ces produits sur internet et les réseaux sociaux (Instagram, Snapchat, Facebook) est abondante. En 2015, le marché mondial des protéines de lait en poudre est de 9,2 milliards d'euros [2]. Ce marché est en progression constante également en France où les marques se livrent une bataille féroce. La large diffusion dans la population de ces produits, le marketing agressif utilisé par les fabricants et revendeurs, m'ont fait me poser des questions quant au rôle que joue le pharmacien dans la distribution de ces produits.

Nous examinerons ainsi l'intérêt de la consommation de ces aliments diététiques de l'effort issus du lait, leurs effets secondaires, la réglementation et le rôle du pharmacien dans leur distribution. Dans le cadre de cette thèse, nous détaillerons dans un premier temps le métabolisme et la contraction musculaire. Puis nous rappellerons les besoins nutritionnels en fonction du type d'activité. Il est indispensable de connaître les besoins spécifiques d'un individu en fonction de son activité avant de le conseiller sur son alimentation et sur son éventuelle prise d'aliments diététiques de l'effort.

Pour se faire, nous nous baserons sur des littératures, documentations, questionnaire.

PARTIE 1

Muscles, activité physique et besoins nutritionnels chez le sportif

A. Protéines et prise de masse musculaire chez le sportif

A.1. Physiologie de la contraction musculaire

A.1.1. Les tissus musculaires

Le corps humain est composé de plus de 600 muscles. La masse des tissus musculaires représente en moyenne 40 % de la masse totale de l'organisme [86].

Il existe trois différents types de muscles : les muscles lisses, le muscle cardiaque et les muscles striés squelettiques. Le muscle cardiaque et les muscles lisses (intestin, paroi des vaisseaux sanguins, bronches, vessie) sont sous le contrôle du système nerveux autonome et du système endocrinien, ils se contractent de manière involontaire. Les muscles striés squelettiques sont sous le contrôle du système nerveux central, ils fonctionnent dépendamment de la volonté.

Les muscles striés squelettiques composent le système locomoteur. Ils ont quatre principaux rôles : le maintien postural, le stockage d'énergie (stockage du glucose sous forme de glycogène), la mobilité du squelette et la production de chaleur [86].

A.1.2. Le muscle strié squelettique

Le muscle strié squelettique a cinq fonctions :

- L'excitabilité : capacité du muscle strié squelettique d'entrer en action sous l'influence d'un excitant artificiel ou physiologique.
- La contractilité : est la capacité qu'a le muscle strié squelettique à se contracter avec force en présence de la stimulation appropriée, et permettre la mobilisation des membres. Si la contraction n'entraîne pas de mouvement, il s'agit d'un régime de contraction isométrique. Si la contraction entraîne un raccourcissement global du muscle, il s'agit d'un régime de contraction concentrique. Enfin, si la contraction entraîne un allongement du muscle, il s'agit d'un régime de contraction excentrique.
- L'élasticité : est la capacité du tissu musculaire à reprendre sa forme initiale lorsque s'arrête la contraction.
- La tonicité : est la capacité du muscle à être dans un état de tension permanent.
- La plasticité : est une caractéristique qu'a le muscle squelettique à modifier sa

structure interne en fonction du travail qu'il effectue et à s'adapter au type d'effort.

A.1.3. Histologie du muscle strié squelettique

Les muscles squelettiques sont reliés au os par l'intermédiaire des tendons. Sur une coupe transversale d'un muscle squelettique, on observe successivement du tissu musculaire et du tissu conjonctif [87] :

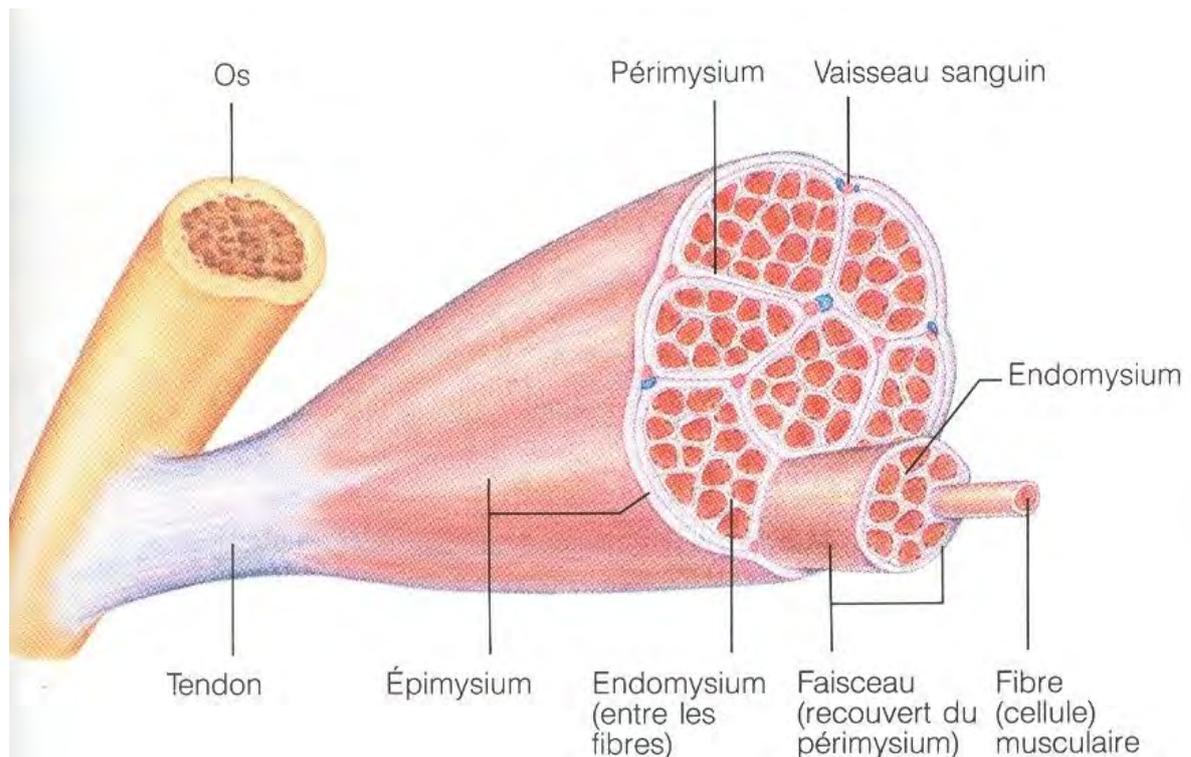


Figure 1 : Anatomie du muscle strié squelettique selon Marieb E [87].

Au centre de la figure 1, on trouve les cellules musculaires qui sont allongées, ce sont les fibres musculaires. Elles sont enveloppées dans du tissu conjonctif : l'endomysium. Les fibres musculaires sont groupées en faisceaux musculaires qui sont eux-mêmes entourés par le périmysium. L'ensemble des faisceaux musculaires forment le muscle squelettique qui est enveloppé par du tissu conjonctif : l'épimysium. Le tissu conjonctif a un rôle de support pour le système vasculaire et le réseau nerveux, les vaisseaux sanguins traversent l'épimysium puis se ramifient pour former un réseau de capillaires irrigant les fibres musculaires. Pour le réseau nerveux, les nerfs vont conduire les messages nerveux envoyés par le système nerveux central

jusqu'aux fibres musculaires par l'intermédiaire des jonctions neuromusculaires [87].

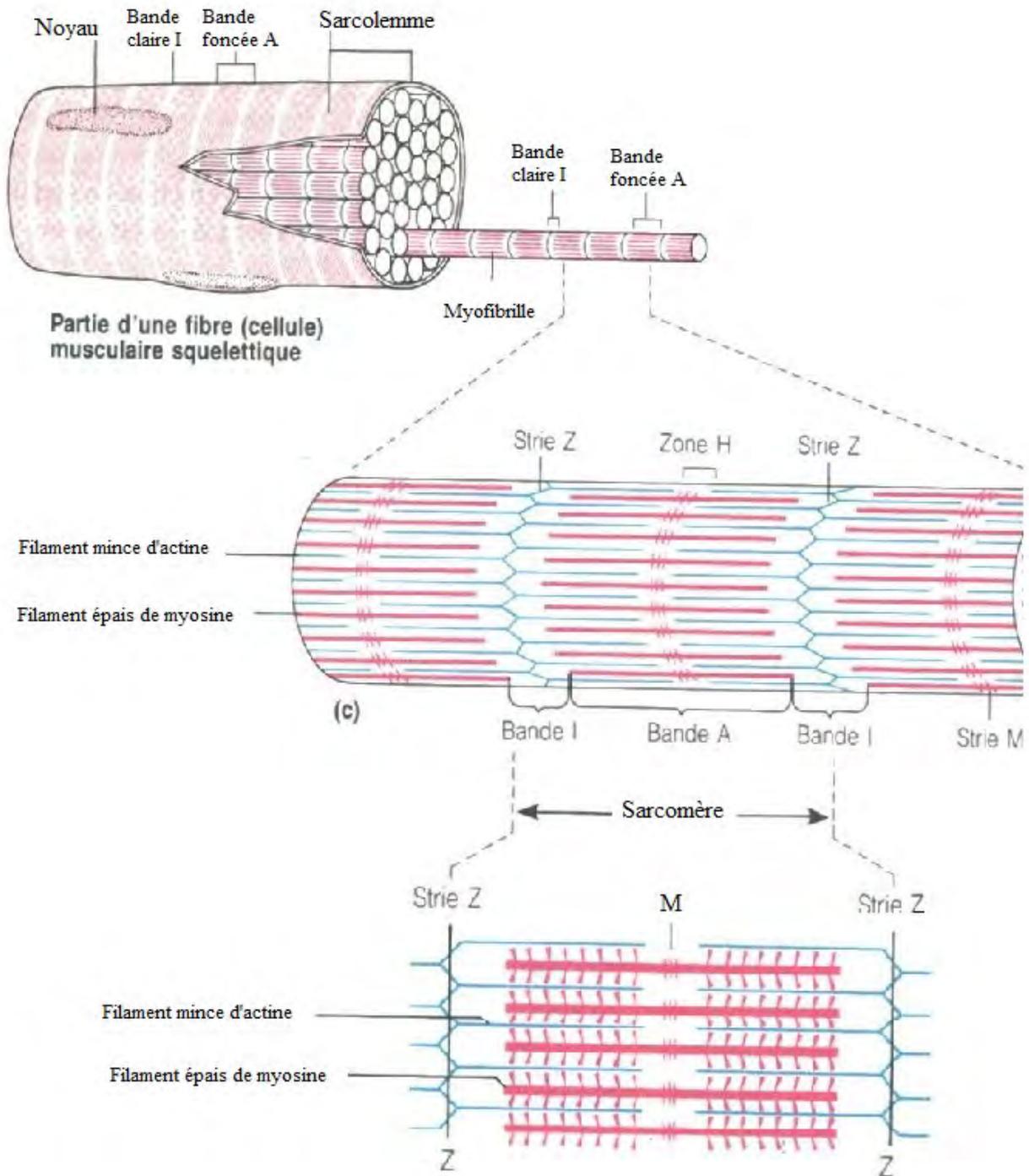


Figure 2 : Structure et ultrastructure de la fibre musculaire (myocyte) [87].

Au niveau cellulaire, les fibres musculaires ou myocytes sont des cellules plurinucléées, leurs longueurs varient selon le muscle auquel appartient la fibre. Les noyaux sont situés en périphérie du sarcoplasme sous la membrane sarcoplasmique. La membrane

sarcoplasmique est associée à l'endomysium et l'ensemble est dénommé sarcolemme. Dans les myocytes, on trouve des myofibrilles assemblées en stries latérales (bande claire I et bande foncée A) qui contiennent des protéines filamenteuses assurant le travail musculaire, elles occupent la majeure partie du sarcoplasme. La bande I est coupée en deux par la strie Z, la bande A est coupée en deux par la strie M centrale plus sombre. C'est le segment de myofibrille compris entre deux stries Z qui est appelé le sarcomère. Le sarcomère est considéré comme l'unité contractile de la fibre musculaire, lui même constitué de deux types de filaments : les filaments minces et épais.

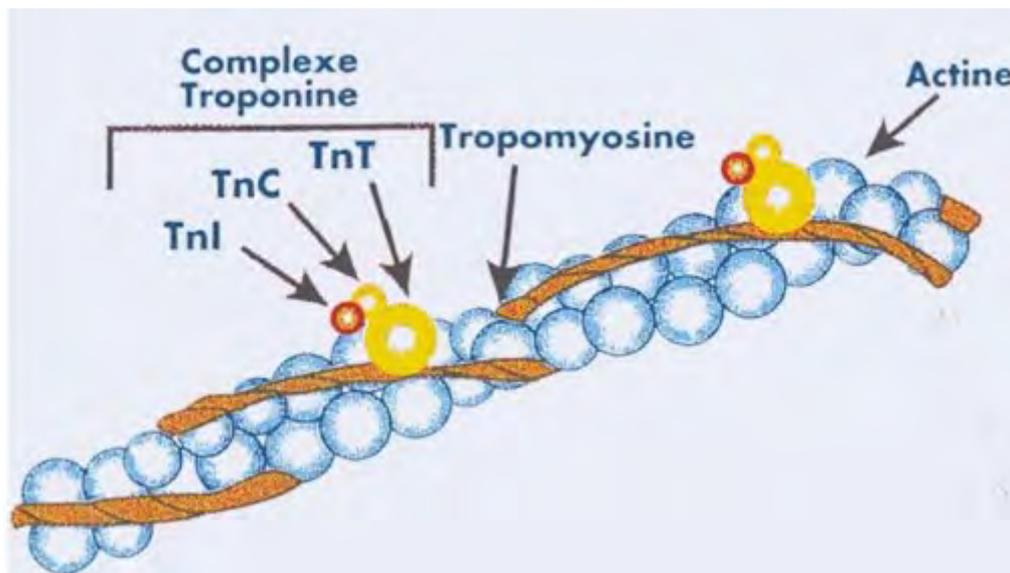


Figure 3 : Filament mince d'actine.

Les filaments minces sont constitués principalement par de l'actine. L'actine est une protéine bi-globulaire, le filament d'actine est un homopolymère d'actine disposé de façon hélicoïdale (double spirale). Le complexe troponine et la tropomyosine sont des protéines régulatrices de la contraction. La tropomyosine s'enroule autour de l'actine en super hélice, la tropomyosine est reliée au filament d'actine et à un complexe troponine composé de trois sous-unités :

- La troponine T permet la liaison troponine/tropomyosine.
- La troponine C fixe le calcium en l'occurrence quatre molécules de calcium pour une molécule de myosine.
- La troponine I qui régule l'interaction actine/myosine, par l'intermédiaire d'une inhibition de l'activité ATPasique de la myosine.

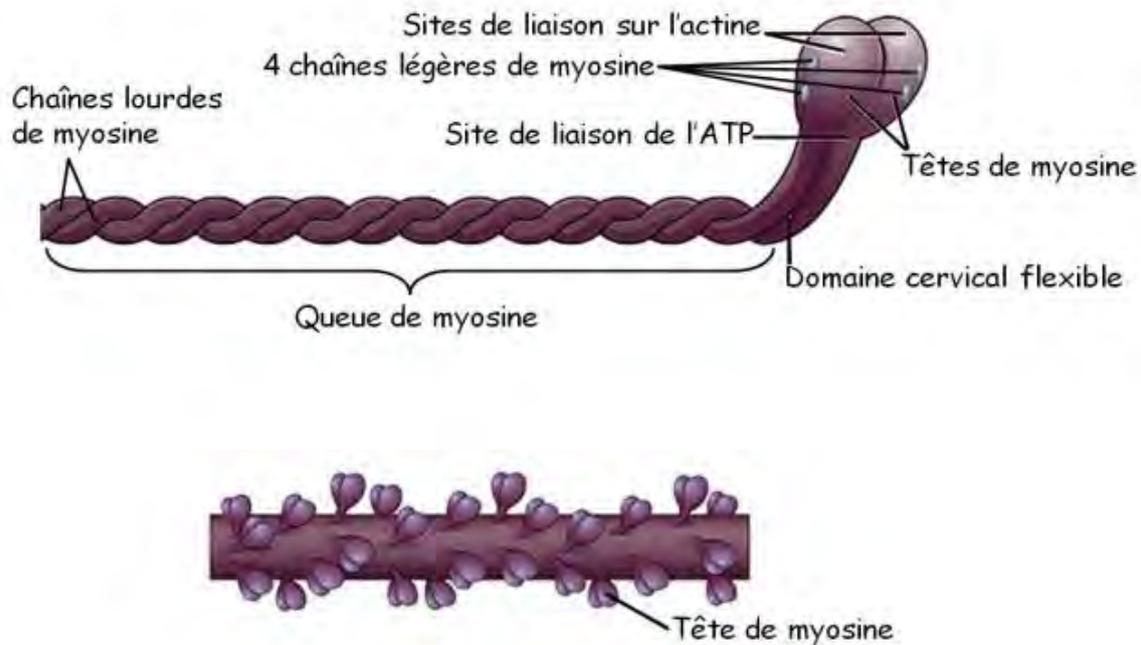


Figure 4 : Filament épais de myosine.

Les filaments épais sont composés de myosine. La myosine est formée de deux chaînes lourdes enroulées en hélice se terminant par deux têtes de myosine et de 4 chaînes légères. Chaque tête de myosine dispose de deux chaînes légères, ce sont les têtes de myosine qui vont permettre la fixation de la myosine sur l'actine et rendre possible la contraction musculaire [87].

A.1.4. Jonction neuromusculaire

L'ensemble motoneurone (neurone situé dans le système nerveux central et la moelle épinière), l'axone et les fibres musculaires qu'il innerve forme l'unité motrice. Au sein de cette unité motrice, la connexion entre le motoneurone et la fibre musculaire qui est une synapse neuromusculaire est appelée la plaque motrice. A la surface du muscle, on observe de nombreux replis qui servent à augmenter sa surface de réception des neurotransmetteurs. Lorsque le potentiel d'action qui parcourt l'axone du motoneurone arrive au niveau de la plaque motrice, l'acétylcholine est émise dans la fente synaptique qui va se fixer sur les récepteurs à l'acétylcholine sur la surface de la fibre musculaire. Il en résulte une dépolarisation musculaire qui par l'intermédiaire d'une cascade de réactions chimiques

provoque la contraction musculaire.

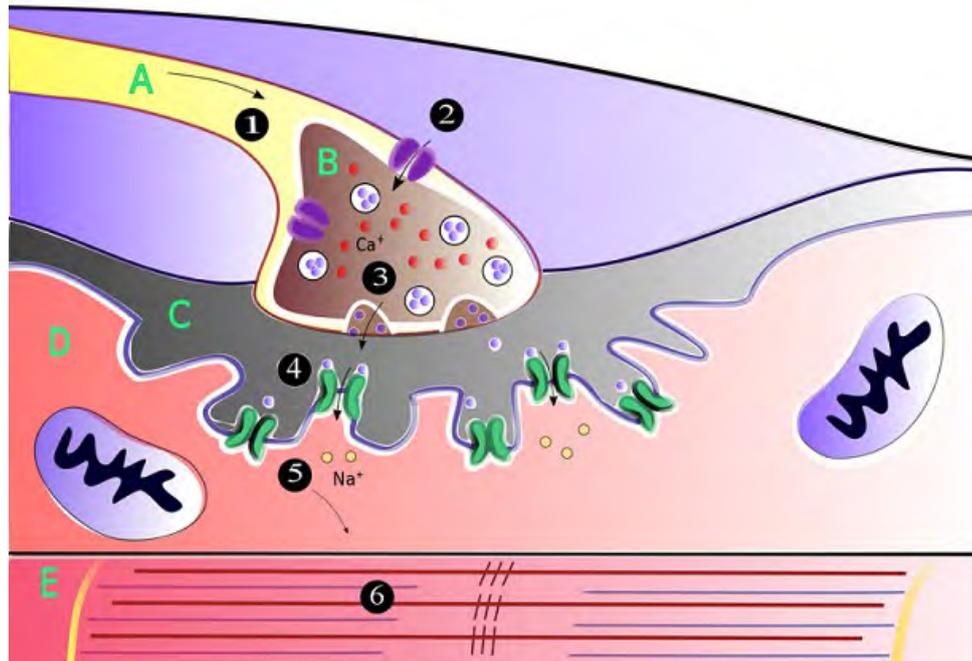


Figure 5 : la plaque motrice : en 1 le potentiel d'action parcourt l'axone du motoneurone, ce potentiel d'action arrive dans le bouton synaptique (en 2) ce qui permet l'ouverture des canaux ioniques au calcium dépendants du voltage. Cette ouverture fait monter la concentration de calcium dans le bouton synaptique, ce qui entraîne la fusion des vésicules synaptiques à la membrane (en 3). Le contenu des vésicules synaptiques (acétylcholine) est libéré dans la fente synaptique. En 4, l'acétylcholine se fixe aux récepteurs à l'acétylcholine présents sur la fibre musculaire. Ceci provoque en 5, l'ouverture des canaux sodiques et potassiques qui permet l'apparition d'un potentiel d'action à l'origine de la contraction musculaire en 6 [97].

A.1.5. La contraction musculaire

La contraction musculaire est un phénomène lié au déplacement des filaments d'actine sur les filaments de myosine, ce qui provoque un raccourcissement des sarcomères.

A partir de la fixation de l'acétylcholine sur les récepteurs des fibres musculaires, un potentiel d'action musculaire apparaît (grâce à l'ouverture des canaux sodiques et potassiques). Ce potentiel d'action va se propager sur la membrane de la cellule musculaire et activer des récepteurs voltages dépendants appelés récepteurs à la dihydropyridine (DHP-R). L'activation

des DHP-R provoque l'entrée d'ions calcium extracellulaires dans la cellule musculaire. Le potentiel d'action conduit ensuite à la libération massive du calcium contenu dans les citernes terminales du réticulum sarcoplasmique au niveau de l'espace intracellulaire. Le calcium devient largement disponible au niveau des myofibrilles [87].

Au repos, la troponine C n'est pas liée au calcium (concentration faible en calcium au niveau intracellulaire). D'autre part quand le niveau de calcium intra cellulaire est faible, la troponine I inhibe la liaison actine/myosine, les sites de liaison actine/myosine sont recouverts par la tropomyosine dans cette conformation. Quand le potentiel d'action musculaire provoque une augmentation forte de la concentration en calcium intracellulaire, le calcium se fixe sur son site spécifique présent sur la troponine C. Cette fixation de calcium sur la troponine C permet une modification de la conformation de la tropomyosine en libérant les sites de fixation présents sur les filaments d'actine. Les têtes de myosine peuvent se fixer sur les filaments d'actine rendant la contraction possible.

A.1.6. Mécanisme moléculaire de la contraction musculaire

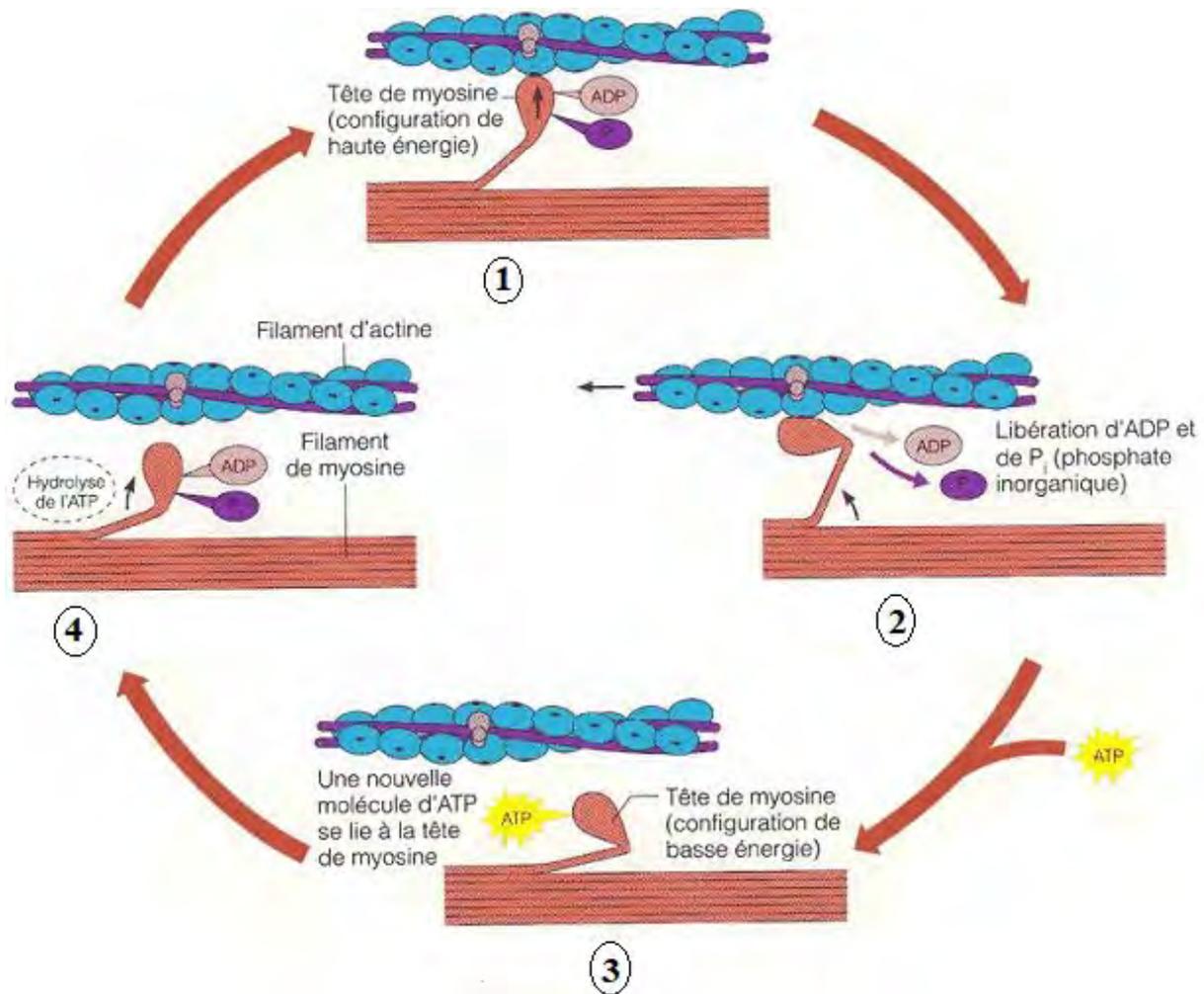


Figure 6 : Cycle de l'ATP dans la contraction musculaire [87].

Après la fixation du calcium sur la troponine C et la modification conformationnelle de la tropomyosine, il y a hydrolyse d'une molécule d'ATP au niveau de la tête de myosine. Cela permet la formation d'un complexe ADP- P_i -actine-myosine (en 1 sur la [figure 6](#)). En 2, la libération du P_i et de l'ADP stabilise la liaison actine-myosine et provoque un changement de conformation de la tête de myosine. La tête de myosine fait un angle qui passe de 90° à 45° , ce mouvement de flexion va entraîner le filament d'actine sans modification de longueur de celui-ci. Ce glissement des filaments d'actine sur les filaments de myosine réduit la taille du sarcomère. La liaison d'une nouvelle molécule d'ATP sur la tête de myosine permet la dissociation de la liaison actine-myosine (en 3). Et enfin en 4, l'hydrolyse de la nouvelle molécule d'ATP en ADP- P_i permet à la tête de myosine de retrouver son inclinaison initiale (inclinaison de 45° à 90°).

L'énergie chimique (ATP) est convertie en mouvement mécanique, la contraction musculaire [87].

A.1.7. La relaxation

Lorsque l'influx nerveux cesse et que la libération d'acétylcholine dans la fente synaptique cesse, le calcium cesse d'être libéré dans l'espace intracellulaire de la cellule musculaire (fermeture des canaux calciques, pompage actif par des pompes ATPases calcium-dépendantes des ions calcium dans le réticulum sarcoplasmique) le calcium ne peut plus se fixer sur la troponine C. Dans ces conditions la tropomyosine reprend sa conformation initiale, les têtes de myosine ne peuvent plus se fixer aux sites de liaisons des filaments d'actine, il y a relâchement musculaire.

A.2. Physiologie de la prise de masse musculaire

Il existe deux types de fibres musculaires dans les muscles striés squelettiques, même si la physiologie de la contraction musculaire est identique et qu'ils sont tous deux constitués de myocytes, ceux-ci possèdent des propriétés différentes.

- Les fibres de type I : elles sont très vascularisées et contiennent beaucoup de myoglobine (métalloprotéine contenant du fer capable de stocker l'O₂) et possèdent peu de réserve en glycogène. Ce sont des fibres plus efficaces lors d'exercices en aérobie. Ce sont les fibres de l'endurance [24].
- Les fibres de type IIa et IIb : à contraction elles possèdent peu de myoglobine et une grande réserve en glycogène. Elles sont très efficaces pour les exercices en anaérobie et plus puissantes pour des efforts courts. Elles sont plus volumineuses, ce sont les fibres de la force [24].

En fonction du sport pratiqué, la composition musculaire en fibres de type I ou II va varier dans le muscle squelettique strié. Si le sport pratiqué favorise les efforts en anaérobie et de force, la proportion de fibres de type II sera importante. Et inversement, plus le sport pratiqué favorise les efforts en aérobie et l'endurance, plus la proportion de fibres de type I sera importante [25].

En fonction de l'exercice il y a d'un côté une protéolyse durant les efforts de longue

durée (sport d'endurance) pour fournir du substrat énergétique qui peut atteindre 10 % de la dépense énergétique totale [26]. Ce qui est suffisant pour entraîner des modifications structurelles et fonctionnelles des muscles. De l'autre côté pendant un sport de force, il y a un phénomène de récupération post-exercice qui entraîne une augmentation de l'anabolisme musculaire sous l'influence de divers phénomènes (sécrétion hormonale, état nutritionnel, intensité de l'exercice).

C'est l'activation de ces mécanismes qui va influencer sur les besoins en protéines de l'organisme.

A.3. Vieillesse musculaire

A partir de l'âge de 50 ans, le système musculo-squelettique décline. En effet, la masse musculaire peut diminuer de 1 à 2 % par an en association avec une perte de la force musculaire de l'ordre de 1,5 % par an, il s'agit de la sarcopénie [83].

C'est un syndrome caractérisé par une perte progressive et généralisée de la masse et de la fonction musculaire squelettique augmentant le risque de dépendance physique, d'altération de la qualité de vie [84].

Cette régression de la masse musculaire avec l'âge s'explique par une perte de fibres musculaires préférentiellement de type II. Le calibre de ses fibres peut diminuer de 20 à 60 %. Les mécanismes impliqués dans l'atrophie musculaire sont de plusieurs types. Premièrement, la diminution de la synthèse protéique musculaire entraîne une diminution du renouvellement protéique, notamment les protéines contractiles (chaînes lourdes de myosine). Deuxièmement, les cellules souches des muscles ainsi que leurs différenciations deviennent de moins en moins nombreuses. Le métabolisme hormonal avec l'âge est fortement perturbé, la concentration en hormone circulante diminue (testostérone, GH, IGF-1) mais également la sensibilité des cellules musculaires à ces hormones baissent. L'activité anti-oxydante (glutathion peroxydase, catalase) des myocytes est diminuée. Les dommages de l'oxydation des protéines, des membranes lipidiques et des acides nucléiques cellulaires augmentent la lyse cellulaire. Le système nerveux est également un facteur dans la régression de la masse musculaire dans la sarcopénie. On remarque une dénervation des fibres musculaires avec l'âge qui peut aller jusqu'à une altération de la coordination et de la puissance musculaire. Enfin, on constate une rétention splanchnique, les acides-aminés sont séquestrés au niveau du foie, de la rate et de l'intestin pour leurs besoins propres. Ceci limite la biodisponibilité postprandiale des

acides aminés, et, par conséquent la réponse anabolique [84]. Ces phénomènes sont souvent corrélés avec une alimentation chez la personne âgée inadaptée (malnutrition, apport protéique insuffisant) et une diminution de l'activité physique [85].

Pour les raisons citées précédemment, la prise en charge de la sarcopénie peut commencer par la mise en place d'un régime assurant un apport protéiné suffisant. Selon l'ANSES pour les personnes âgées, 1 à 1,2 g/kg/j (ou 15 % des AET) est un minimum recommandé pour l'apport nutritionnel en protéines [9].

A.4. Protéines et besoins nutritionnels du sportif

A.4.1. Métabolisme protéique

Les protéines ont un rôle clé dans l'organisme, elles ont un rôle structural et participent au renouvellement des tissus musculaires essentiels à toutes activités physiques. De plus, elles participent à de nombreux processus physiologiques par exemple sous la forme d'enzymes, d'hormones, d'immunoglobulines.

A.4.1.1. Schéma général du métabolisme protéique chez l'homme

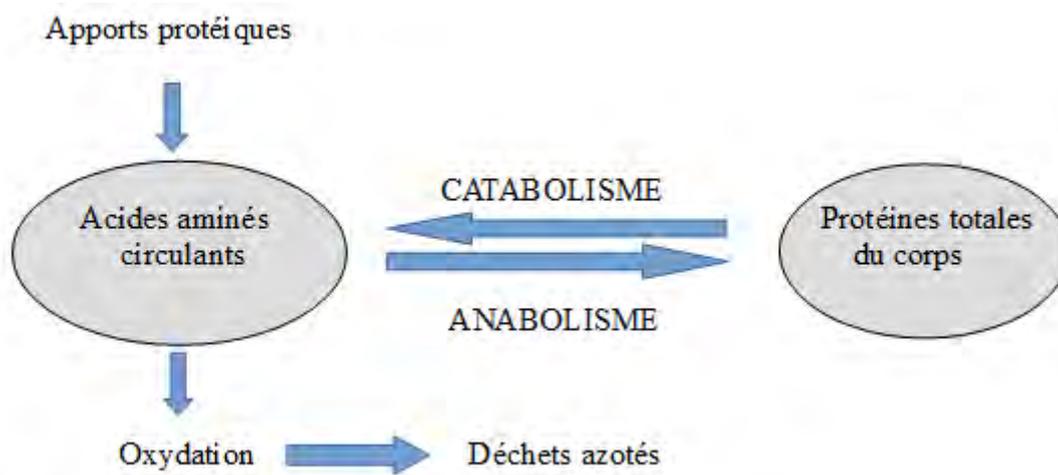


Figure 7 : Métabolisme protéique chez l'homme. Les acides aminés circulants sont utilisés pour produire des protéines, c'est l'anabolisme. Les protéines sont hydrolysées en acides aminés pour les besoins de l'organisme, c'est le catabolisme. Les acides aminés en

excès sont éliminés par oxydation.

Les protéines sont en permanence remaniées selon un mécanisme biochimique associant synthèse et catabolisme protéique. Ce mécanisme est régulé par de multiples facteurs (nutrition, facteurs hormonaux, exercice physique, pathologie).

A.4.1.2. Paramètres cinétiques du métabolisme protéique

La synthèse protéique se fait à partir du pool d'acides aminés circulant, la protéolyse quant à elle libère les acides aminés dans ce même pool. Lorsque ces acides aminés sont altérés ou oxydés ils sont dégradés. Les produits de ce catabolisme sont des déchets azotés et du CO₂. Les apports protéiques compensent donc les pertes des acides aminés altérés. La synthèse protéique peut donc se faire à partir d'acides aminés provenant des apports protéiques ou de la protéolyse [3].

Le bilan azoté est la différence entre l'apport protéique et les pertes (azote fécal, azote urinaire, autres pertes azotés).

A.4.1.3. Renouvellement des protéines

On trouve plusieurs dizaines de milliers de protéines chez l'homme assurant diverses fonctions, quantitativement chez un homme adulte de 70 kg la quantité totale de protéines est entre 10 et 12 kg. Le collagène, protéine de structure, représente à lui seul 25 % des protéines corporelles. La portion d'acides aminés sous forme libre représente 100 g de la quantité totale en protéine. Les 4 organes les plus concernés par le renouvellement protéique sont les muscles (40%), le foie, l'intestin, et la peau. La rapidité de renouvellement de chaque protéine est très variable.

Ainsi, les tissus du foie et de l'intestin qui ne représentent que seulement 10 % de la masse protéique corporelle totale représentent 50 % environ du renouvellement protéique, à comparer au tissu musculaire qui correspond à plus de 40 % de la masse protéique corporelle totale qui contribue à seulement 25 % du renouvellement protéique [4].

A.4.1.4. Variation du renouvellement des protéines

Le renouvellement protéique est plus rapide chez l'enfant en bas âge (10 à 15g/kg/j)

que chez un individu adulte de condition normale (environ 4 g/kg/j). Chez le sujet âgé il semble être ralenti.

Le renouvellement protéique est ralenti au cours du jeûne où la protéolyse devient supérieure à la synthèse.

Enfin chez les sportifs ce renouvellement peut-être significativement augmenté suivant l'intensité de l'exercice. Globalement, on assiste à une augmentation des dégradations (catabolisme) pendant la durée de l'exercice et une augmentation de la protéosynthèse en période de récupération. C'est l'importance quantitative de ces réponses et leur enchaînement dans le temps qui varient suivant le type et l'intensité de l'exercice [4].

A.4.2. Métabolisme protéique chez les sportifs

A.4.2.1. Métabolisme protéique chez le sportif d'endurance

Suivant le niveau, le sportif d'endurance peut métaboliser de 2000 kcal/semaine d'énergie jusqu'à plus de 40 000 kcal/semaine pour les sportifs de très haut niveau (cyclisme, natation...). Dans ces conditions particulières, même si l'intensité du travail musculaire peut être faible à modéré suivant le sport, la part du métabolisme oxydatif des protéines sera d'autant plus importante que la durée et l'intensité de l'exercice sera importante. En effet, la diminution voir l'épuisement des réserves en glycogène (hépatique et musculaire) et la part limitée physiologiquement du métabolisme oxydatif des acides-gras en terme de vitesse de production de substrat énergétique, entraîne une augmentation de l'oxydation des composés azotés de l'organisme [5].

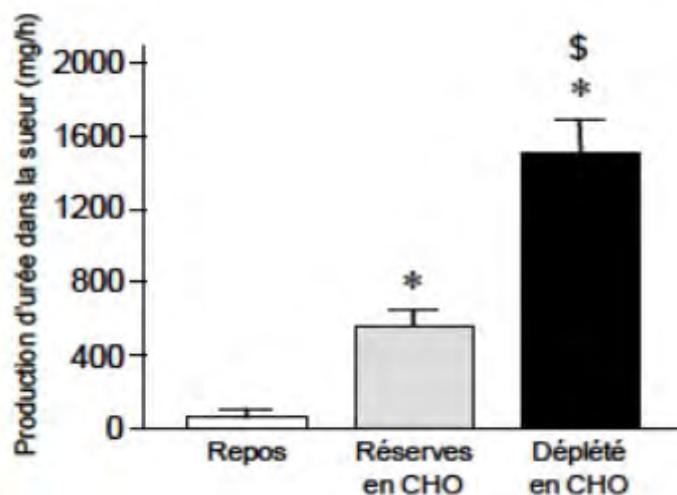


Figure 8: Conséquences de la baisse de la disponibilité en glucides (CHO) sur

l'utilisation des composés azotés estimée par la perte d'urée par la sueur. D'après Lemon et Mullin, 1980 [95].

Les mesures sont réalisées au repos et à l'exercice, chez les sujets ayant une bonne disponibilité en glycogène avant l'exercice, ou préalablement déplétés.

* : différence par rapport aux pertes enregistrées au repos, $P < 0,05$. \$: différence liée à la mauvaise disponibilité en glucides, $P < 0,05$.

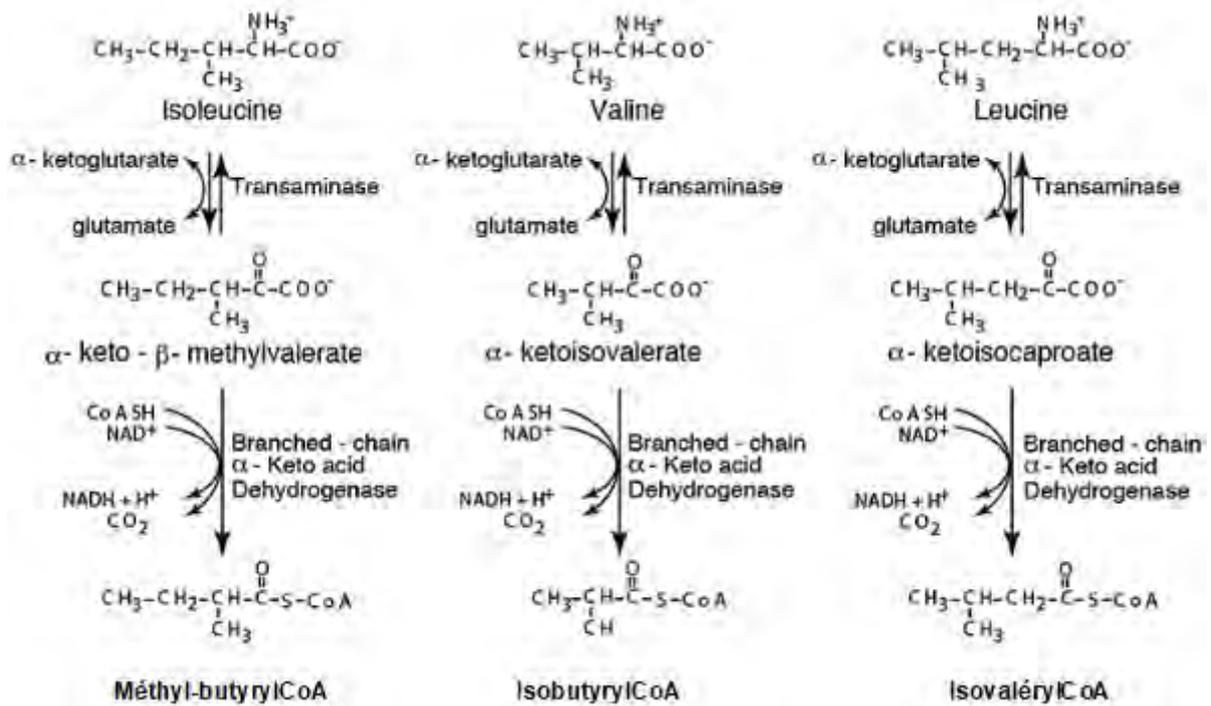


Figure 9 : Dégradation de la leucine, isoleucine et valine. Ce sont des acides aminés à chaîne latérale ramifiée [5].

Dans ce processus d'oxydation interviennent deux enzymes, une transaminase et une déshydrogénase des α-cétoacides à chaîne ramifiée [5]. Cette enzyme a pour cible les acides aminés à chaîne latérale ramifiée (« BCAA : Branched Chain Amino Acids » en anglais), il s'agit de l'isoleucine, la leucine et la valine. Ce sont préférentiellement ces acides-aminés qui sont oxydés durant un effort musculaire. Au repos, la proportion de l'apport en énergie à partir des protéines totales pour l'ensemble du corps est d'environ 5% tandis que pendant un exercice d'endurance, au delà de 15 min, ce phénomène peut fournir jusqu'à 25% de l'énergie nécessaire. Il existe d'autres facteurs qui augmentent l'oxydation des acides aminés. Par exemple, le déficit hydrique augmente l'oxydation des acides aminés mais aussi une

alimentation riche en protéines [6].

L'apport de glucose pendant l'exercice d'endurance permet de réduire jusqu'à 20% l'oxydation de la leucine [6].

A contrario, chez le sujet entraîné pour un exercice de même intensité, l'activité de la BCKA-DH (Branched-Chain Keto Acid Dehydrogenase) sera moins importante que chez un sujet non-entraîné [72].

Compte tenu de leur importance quantitative dans l'organisme, les muscles squelettiques représentent le réservoir en BCAA le plus important. L'utilisation métabolique des acides aminés musculaires entraîne des conséquences fonctionnelles importantes dont la lyse des protéines contractiles, ce qui provoque fatigue et courbature musculaire.

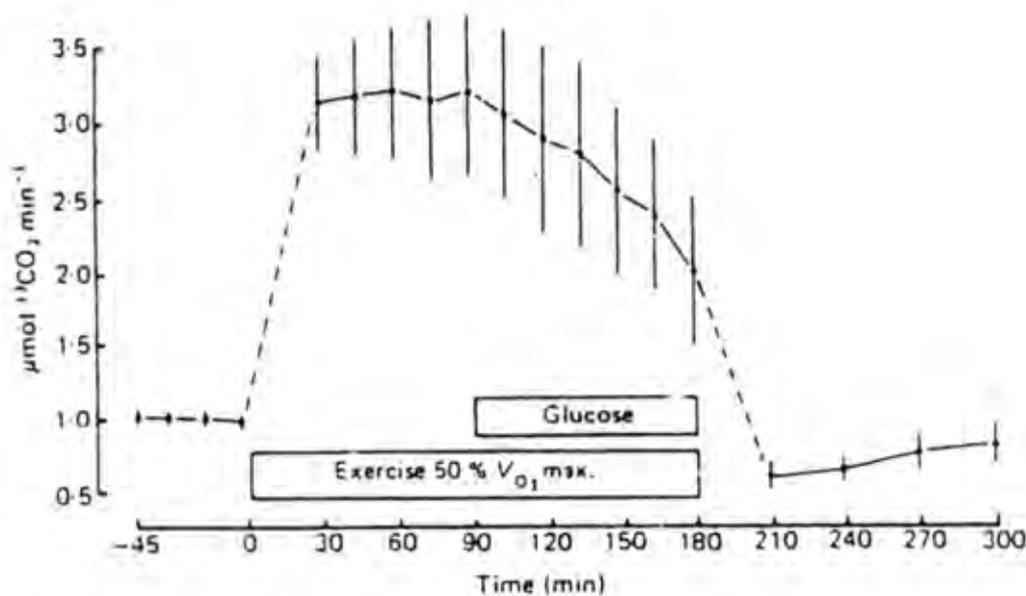


Figure 10 : Influence de la prise de glucose pendant l'exercice sur l'oxydation de la leucine d'après Davies et al., 1982.

En abscisse, il s'agit de la production de $^{13}\text{CO}_2$ (après introduction de ^{13}C leucine) qui reflète directement la quantité de leucine oxydée pendant l'exercice. Après l'introduction de glucose à $T = 90$ min, l'oxydation de la leucine est réduite.

Au niveau de l'anabolisme, celui-ci est considérablement réduit pendant l'exercice, jusqu'à 30% ce qui permet bien sûr d'augmenter la disponibilité de substrats oxydables nécessaire à la production d'énergie pendant l'effort. A l'arrêt de l'effort, on constate qu'après

10 minutes suivant la fin de l'effort, il y a augmentation de la synthèse protéique par rapport au niveau basal. La durée de ce phénomène va dépendre de l'intensité et de la durée de l'effort mais aussi du statut nutritionnel [6].

A.4.2.2. Métabolisme protéique chez le sportif de force

Chez le sportif de force, l'accroissement musculaire qui est constaté par rapport à un individu sédentaire correspond à un bilan entre la protéolyse et la protéosynthèse positif en faveur de la protéosynthèse. L'exercice de force ne provoque pas lui-même des modifications importantes sur le métabolisme anabolique, c'est le phénomène de récupération post-exercice qui entraîne une augmentation de l'anabolisme musculaire sous l'influence de divers phénomènes (sécrétion hormonale, état nutritionnel, intensité de l'exercice). Il y a toutefois des lésions musculaires qui peuvent provoquer un stress oxydatif et entraîner un renouvellement. C'est surtout la réponse de l'organisme à l'exercice de force qui provoque l'essentiel de la mobilisation en acides aminés et cette réponse est principalement régulée par des hormones [7].

A.4.2.3. Rôle des hormones dans la synthèse protéique

On note un phénomène, surtout présent chez le sportif de force, qui repose sur une augmentation de l'activité traductionnelle des gènes. Assez tôt après le début de l'entraînement, on observe une augmentation des concentrations plasmatiques de nombreuses hormones anabolisantes comme l'hormone de croissance (GH), l'IGF-1 (Insulin-like Growth Factor-1), une augmentation de la sécrétion de testostérone, et d'insuline [7]. L'insuline est une hormone primordiale dans la régulation du système glycémique de l'individu. Elle est produite dans les cellules β des îlots de Langerhans du pancréas, et, elle a une action anabolisante importante principalement chez l'adulte en diminuant la protéolyse. Il est important de rappeler que la proportion dans l'apport en sucres par l'alimentation entre les sucres complexes et les sucres rapides va influencer la sécrétion d'insuline. Plus la proportion de sucres rapides sera importante plus le pic d'insulinémie sera important. La GH et IGF-1 sont deux hormones anabolisantes vraies qui augmentent la synthèse protéique. La GH est sécrétée par les cellules somatotropes de l'hypophyse, sous le contrôle d'hormones hypothalamiques, en l'occurrence la somatolibérine (qui active la sécrétion) et la somatostatine (qui l'inhibe). Chez l'homme le pic de sécrétion de la GH est pendant la nuit, mais plusieurs stimuli peuvent faire augmenter

la sécrétion comme le stress, l'effort physique, l'hypoglycémie. Il semblerait également que le type de ration alimentaire joue un rôle dans la sécrétion de la GH, en l'occurrence une ration protéinée favoriserait la sécrétion de cette hormone provoquant ainsi une situation favorable à une production musculaire. Pour l'IGF-1, c'est majoritairement la répétition de l'entraînement de force qui provoque une augmentation de sa sécrétion, la production est majoritairement assurée par le foie, et en quantité plus faible, par les muscles sous l'influence de la GH. La testostérone joue un rôle direct dans l'anabolisme musculaire mais interagit également avec le système de l'IGF-1, en augmentant la production de celle-ci dans les muscles squelettiques [7].

Ces hormones décrites précédemment, ont un rôle important dans le processus de récupération et dans l'anabolisme musculaire. Ces informations permettent de mettre en évidence les influences et les synergies qui existent entre disponibilité en acides aminés, GH, IGF-1 et insuline.

A.4.2.4. Notion de qualité d'une protéine alimentaire

Tout d'abord, il existe 20 acides aminés protéinogènes, ils composent les protéines. Ils sont associés pour former des chaînes d'acides-aminés ou polypeptides par l'intermédiaire de liaisons peptidiques. Parmi ces 20 acides-aminés, 9 acides-aminés sont dits essentiels car ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme (ils sont précisés en jaune dans le **tableau 1**). La tyrosine et la cystéine peuvent dans certaines conditions être produites en quantité insuffisante par l'organisme.

Tableau 1 : Liste des acides aminés protéinogènes.

Nom	Code 3 lettres	Nom	Code 3 lettres
Alanine	Ala	Lysine	Lys
Arginine	Arg	Méthionine	Met
Asparagine	Asn	Phénylalanine	Phe
Acide aspartique	Asp	Proline	P
Acide glutamique	Glu	Sérine	Ser
Cystéine	Cys	Tyrosine	Tyr
Glutamine	Gln	Thréonine	Thr
Glycine	Gly	Thryptophane	Trp

Histidine	His	Valine	Val
Isoleucine	Ile	Leucine	L

La qualité d'une protéine est déterminée par deux variables :

- Tout d'abord la digestibilité de la protéine ou coefficient d'utilité digestive (CUD), c'est la capacité de la protéine à libérer ses acides aminés dans la lumière intestinale. Elle est exprimée en pourcentage, qui correspond à la part assimilée par l'organisme sur la part ingérée (ANSES, décembre 2016) [8][9] :

Lait	95
Caséine (chez le porc)	94
Lactosérum (chez le porc)	97
Oeuf	91
Soja	91,5
Pois	89,9
Blé	90
Colza	84

- L'autre variable entrant en compte est la composition en acides-aminoés de la protéine, en effet comme vu précédemment il existe des acides-aminoés essentiels qui ont donc une valeur nutritionnelle plus importante. Pour mesurer cette variable, on utilise l'indice chimique d'une protéine.

Nous pouvons calculer l'indice chimique comme ceci :

Indice chimique = (quantité en mg de l'AA essentiel limitant dans 1 g de protéine/mg du même AA essentiel dans 1 g d'une protéine de référence)*100.

Voici le profil proposé par l'AFSSA (2007) pour une protéine alimentaire de référence chez l'adulte :

	mg/g de protéine	mg/g d'azote
Histidine	17	105
Isoleucine	27	171
Leucine	59	371
Valine	27	171

Lysine	45	286
Méthionine + Cystine	23	143
Phénylalanine + Tyrosine	41	257
Thréonine	25	152
Tryptophane	6	38

Cet indice chimique représente la capacité de la source de protéine à répondre au besoin nutritionnel moyen en protéines. Une valeur supérieure à 100 de l'indice chimique correspond à une protéine capable de répondre aux besoins nutritionnels, si la valeur est inférieure à ce chiffre la protéine ne pourra pas couvrir l'ensemble des besoins. Dans ces conditions il apparaît que les sources de protéines d'origine animale ont une composition qui va couvrir l'ensemble des besoins. A contrario, les protéines de source végétale peuvent présenter un acide-aminé limitant. Par exemple dans le blé, le maïs et le riz la lysine est l'acide-aminé limitant.

A.4.3. Rôle des acides aminés branchés dans la performance et le développement musculaire

En l'absence des acides aminés essentiels (isoleucine, leucine, valine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, tryptophane, histidine) la synthèse des protéines musculaires est impossible. Au sein des acides aminés essentiels, les BCAA (acides aminés à chaîne ramifiée) ont un rôle clé dans la régulation de l'anabolisme musculaire [88].

Les BCAA sont l'isoleucine, la leucine et la valine.

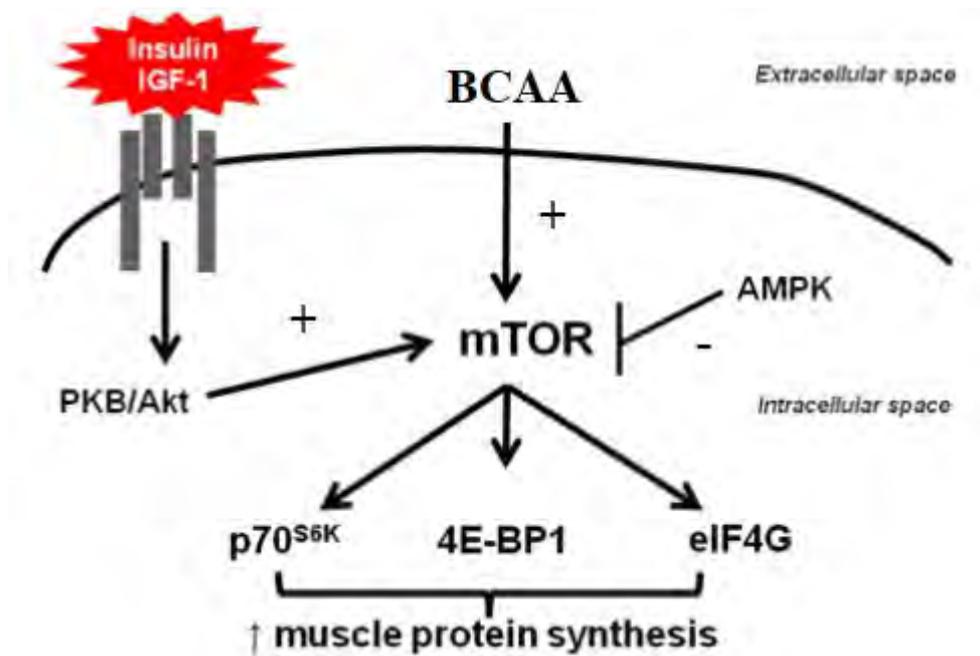


Figure 11 : Régulation de la voie mTOR par les BCAA et influence sur la synthèse protéique. mTOR : cible de la rapamycine chez les mammifères, AMPK : Adénosine Mono Phosphate Kinase [90].

Les BCAA jouent à la fois le rôle de signal et de substrats. En effet, ils permettent d'activer la cascade de réactions de la voie mTOR et de stimuler la synthèse protéique. La déplétion énergétique (ratio ATP/ADP faible) inhibe l'activité de la mTOR via l'AMPK. L'IGF-1 et l'insuline active la mTOR [90].

De plus, comme nous avons pu le voir en amont de ce travail, les acides aminés sont susceptibles de fournir de l'énergie dans la filière aérobie.

Au niveaux des muscles, il y a un équilibre entre utilisation des BCAA pour la production d'énergie et la synthèse protéique [90].

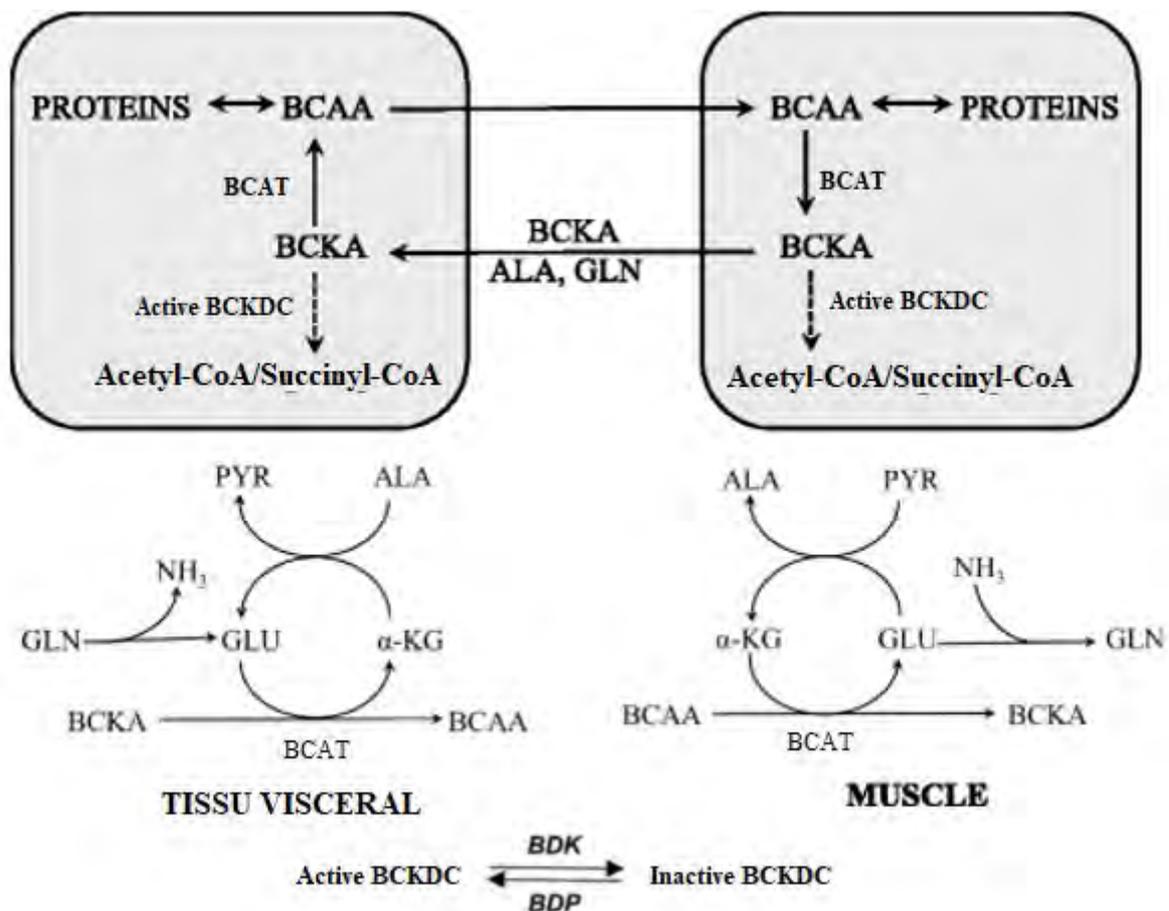


Figure 12 : réactions de la BCAT (Branched Chain Amino-Transférase) et de la BCKDC (Branched Chain Keto acids Dehydrogenase Complex) dans le catabolisme des BCAA au niveau des muscles et des tissus viscéraux. BCKA : Branched Chain Keto Acid, BDK : Branched chain keto acid Dehydrogenase Kinase, BDP: Branched chain keto acid Dehydrogenase Phosphatase, α -KG : α -ketoglutarate [89].

La première étape du catabolisme des BCAA est une transamination réversible catalysée par la BCAT. Il s'agit d'un transfert d'un groupement amine sur l' α -KG qui aboutit à la formation de GLU (glutamate) et de BCKA.

La deuxième étape est une réaction de décarboxylation oxydative des BCKA qui est irréversible et catalysée par la BCKDC. Cette réaction produit de l'Acetyl-CoA et du Succinyl-CoA qui peut être utilisé dans le cycle de Krebs pour produire de l'énergie. L'activité de la BCKDC est régulée par sa phosphorylation. La forme active est déphosphorylée par la BDP et la forme inactive est phosphorylée par la BDK.

Au niveau des muscles squelettiques, la BCAT est très active contrairement à la BCKDC qui est présente principalement sous sa forme phosphorylée, donc inactive. Cet

équilibre permet d'orienter les BCAA vers la synthèse protéique plutôt que vers le catabolisme au niveau musculaire [91].

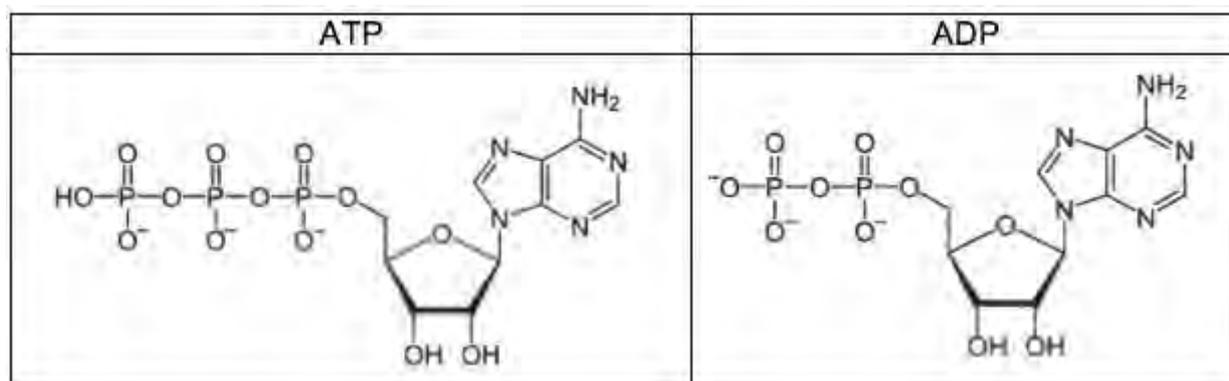
Il est à savoir que les BCAA ne possèdent pas d'allégations autorisées. Il est donc interdit pour les fabricants d'aliments diététiques de l'effort, de préciser que la supplémentation en BCAA participe à l'amélioration de la performance ou au maintien de la masse musculaire. A ce jour, aucun argument scientifique ne permet de justifier la prise de supplément à base de BCAA dans le but d'améliorer les performances physiques. Une alimentation équilibrée et adaptée au sportif permettra un apport suffisant en BCAA et en acides aminés essentiels [92].

B. Nutriments et performance musculaire

B.1. Métabolisme énergétique musculaire et les filières énergétiques

La contraction musculaire nécessite de l'énergie. La seule source d'énergie que peut utiliser le myocyte (cellule musculaire) est l'adénosine triphosphate ou ATP. Les réserves de ces molécules sont faibles et elles vont devoir être renouvelées par l'organisme. Les macronutriments sont après digestion et assimilation, une source d'ATP. Pour la production de l'ATP, il existe trois processus biochimiques : la filière anaérobie alactique, la filière anaérobie lactique et la filière aérobie. L'utilisation des différentes filières énergétiques dépend du type d'effort, de l'intensité, de la durée et des réserves énergétiques.

Tableau 2 : Structure chimique de l'adénosine triphosphate (ATP) et l'adénosine diphosphate (ADP).



B.1.1. Filière anaérobie alactique

Le métabolisme anaérobie alactique est un processus qui synthétise de l'ATP en l'absence d'oxygène et sans production d'acide lactique dans le muscle. Les réserves cellulaires en ATP sont faibles. Au contraire, les réserves en ADP et phosphocréatine (PC) au niveau des cellules musculaires sont conséquentes.



En présence de la créatine kinase, l'ADP subit une phosphorylation grâce au transfert d'un phosphate inorganique depuis la phosphocréatine vers l'ADP. Cette réaction est rapide et renouvelle le stock intracellulaire d'ATP. La diminution de la concentration intracellulaire de l'ATP favorise la catalysation de cette réaction. Ce processus va permettre de fournir presque instantanément une grande quantité d'énergie, mais l'épuisement des réserves de PC est rapide (7 à 15 s). Cette filière énergétique est donc la première utilisée pour les efforts de forte intensité (sprint, haltérophilie). La période de récupération d'un travail musculaire intense correspond à la resynthèse de la phosphocréatine. Cette resynthèse est rapide à l'arrêt d'un exercice intense. La moitié de la phosphocréatine consommée est resynthétisée en 1 min et la totalité en 5-6 min [93]. L'augmentation de la disponibilité de la phosphocréatine au niveau des muscles est un des objectifs de la supplémentation en créatine.

B.1.2. Filière anaérobie lactique

Dans ce processus pour la production d'ATP, la filière anaérobie lactique utilise le glucose (provenant du glycogène contenu dans les muscles et le foie) sans O₂ mais en produisant de l'acide lactique. Cette filière permet de produire de l'ATP pendant quelques minutes en fonction de l'intensité de l'effort, les facteurs limitants de cette filière sont la production de lactate et les enzymes nécessaires à la réaction. Dans cette filière le glucose subit une glycolyse anaérobie, il s'agit d'une hydrolyse par des enzymes dites glycolytiques.

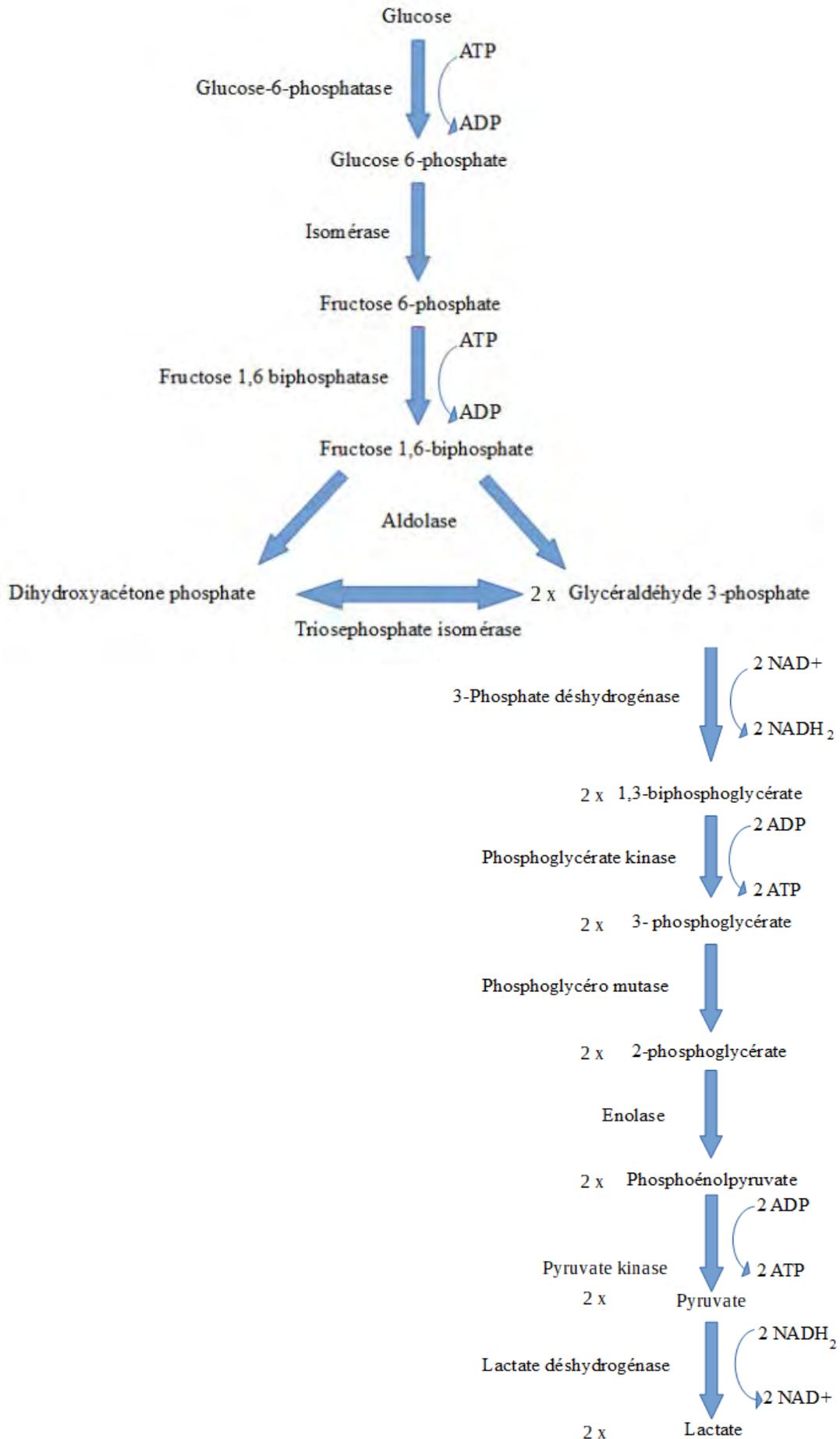


Figure 13 : Glycolyse anaérobie lactique. Le glucose qui circule dans le sang pénètre dans la cellule musculaire (ce qui consomme 1 ATP). Le glucose 6-phosphate est dégradé en pyruvate qui permet de générer 3 ATP, si l'on décompte l'ATP nécessaire pour l'entrée du glucose dans la cellule, en l'absence d'O₂ le bilan final est de 2 ATP et 2 molécules de lactate (lactate déshydrogénase).

Lorsque l'intensité de l'effort augmente en l'absence d'O₂, le lactate va s'accumuler dans les muscles ce qui entraîne une augmentation de l'acidité au sein du muscle. Cette augmentation de l'acidité altère le fonctionnement enzymatique et les échanges d'ions nécessaires lors de la contraction. Cette filière énergétique ne peut fournir de l'énergie aux muscles que sur une courte durée (entre 15 s et 120s suivant l'entraînement du sujet) et dépendamment de la capacité d'accumuler des lactates intracellulaires. Le lactate peut être éliminé dans le foie et le rein où il sera transformé en glucose.

B.1.3. Filière aérobie

Lorsque l'effort se prolonge, les filières précédentes sont dans l'impossibilité de fournir de l'ATP durablement. La filière aérobie peut en présence d'O₂ utiliser le pyruvate pour produire de grande quantité d'ATP.

Les substrats de cette filière en présence d'O₂ sont le glucose (glycolyse aérobie), les acides gras (lipolyse) et parfois les protéines (néoglucogénèse) mais dans une proportion moins importante. Cette voie est activée pour un effort d'une durée supérieure à 2 minutes, et plus l'effort se prolonge, plus la proportion dans l'apport de l'énergie de la filière aérobie deviendra importante.

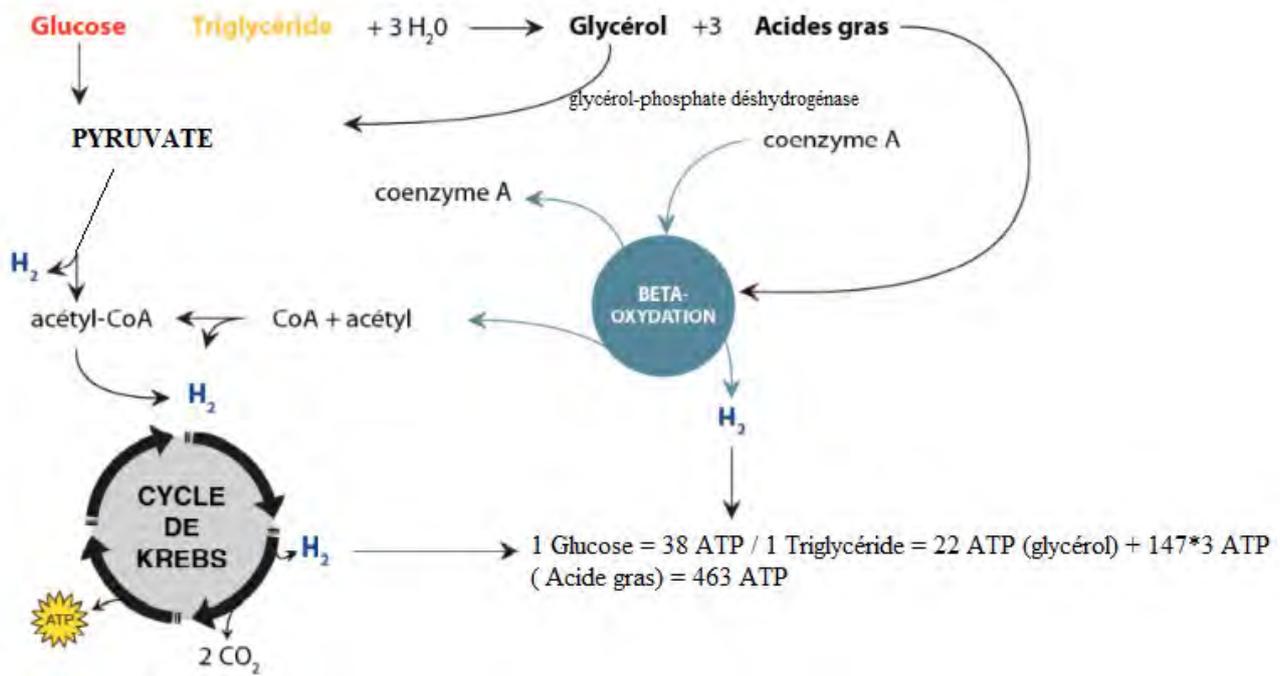


Figure 14 : Apport en ATP de la glycolyse aérobie et lipolyse.

Le bilan final de la glycolyse aérobie, à partir d'une molécule de glucose, est de 38 ATP. Les réserves en triglycérides sont importantes, la dégradation d'une molécule de triglycéride fournit 463 ATP. La puissance maximale du processus aérobie, qui est défini par la VO₂ max (consommation maximale d'oxygène), est limitée par les capacités maximales de transport et d'utilisation de la cellule en O₂. La puissance fournie par cette filière est faible comparativement aux capacités des autres filières, mais la capacité de production de la filière aérobie est très importante.

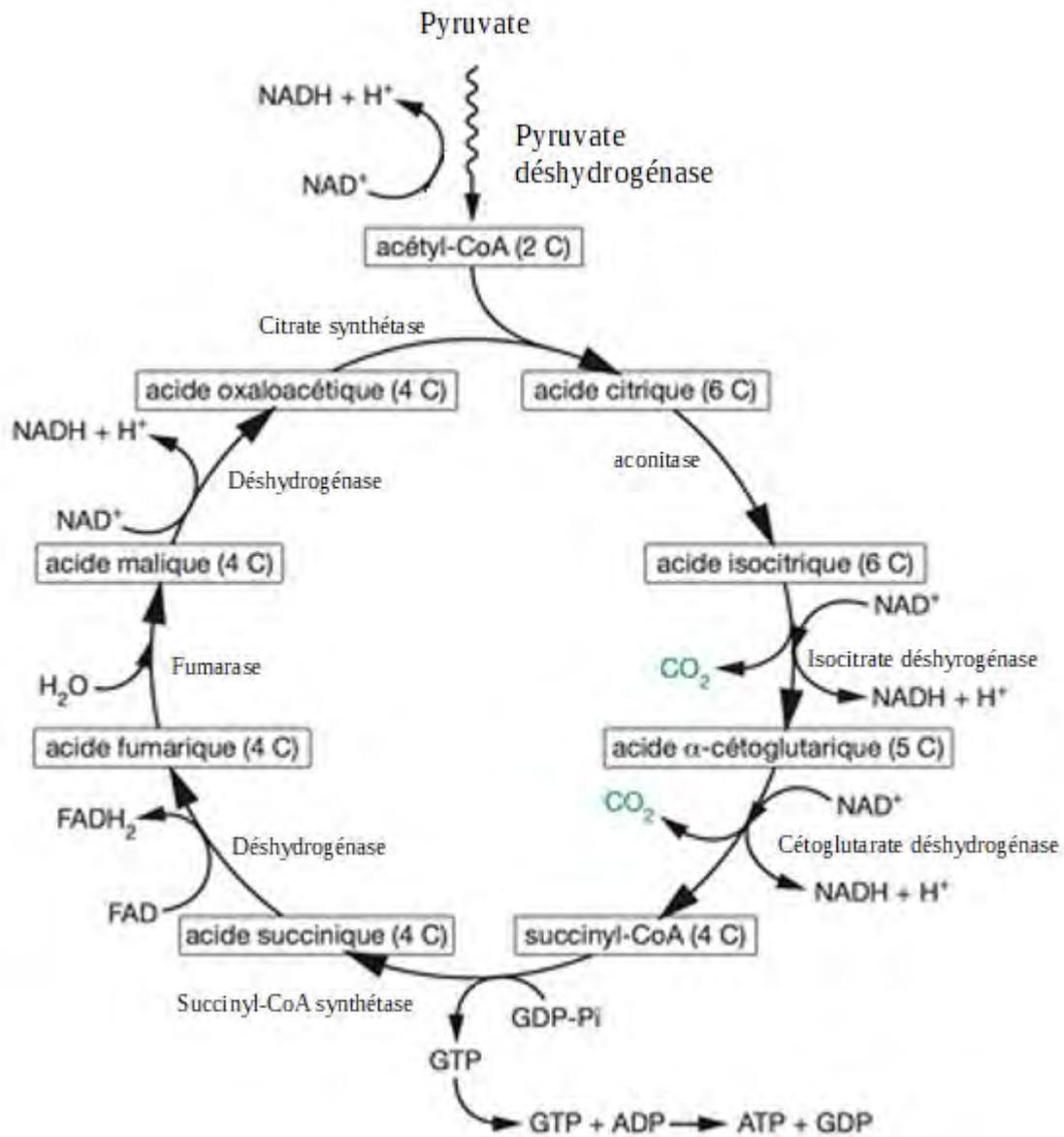


Figure 15 : Cycle de Krebs.

L'acétyl-CoA produit lors de la glycolyse aérobie et de la lipolyse, est utilisé dans un processus métabolique pour former des molécules d'ATP. Il s'agit du cycle de Krebs, c'est un cycle car le dernier métabolite de la réaction (l'acide oxaloacétique) est impliqué dans la première réaction du cycle. La première étape consiste en un transfert d'un groupe acétyle sur l'acide oxaloacétique pour former le citrate (acide citrique). La deuxième est une isomérisation du citrate en acide isocitrique. Il s'en suit une double décarboxylation produisant du CO₂ et du NADH₂ et le succinyl-CoA. Grâce à la succinyl-CoA synthétase et du

GDP, le succinyl-CoA est transformé en succinate. La succinate déshydrogénase catalyse l'oxydation du succinate en fumarate qui est à son tour hydraté par la fumarase pour former le malate (acide malique). Enfin, l'oxydation du malate par la malate déshydrogénase en acide oxaloacétique ferme le cycle. Le bilan de ce cycle est la production de 3 molécules de NADH_2 , 1 GTP (équivalent 1 ATP), 1 FADH_2 . Les NADH_2 et FADH_2 peuvent être utilisés dans la chaîne respiratoire des mitochondries pour produire d'autres molécules d'ATP par l'intermédiaire d'une ATP synthétase.

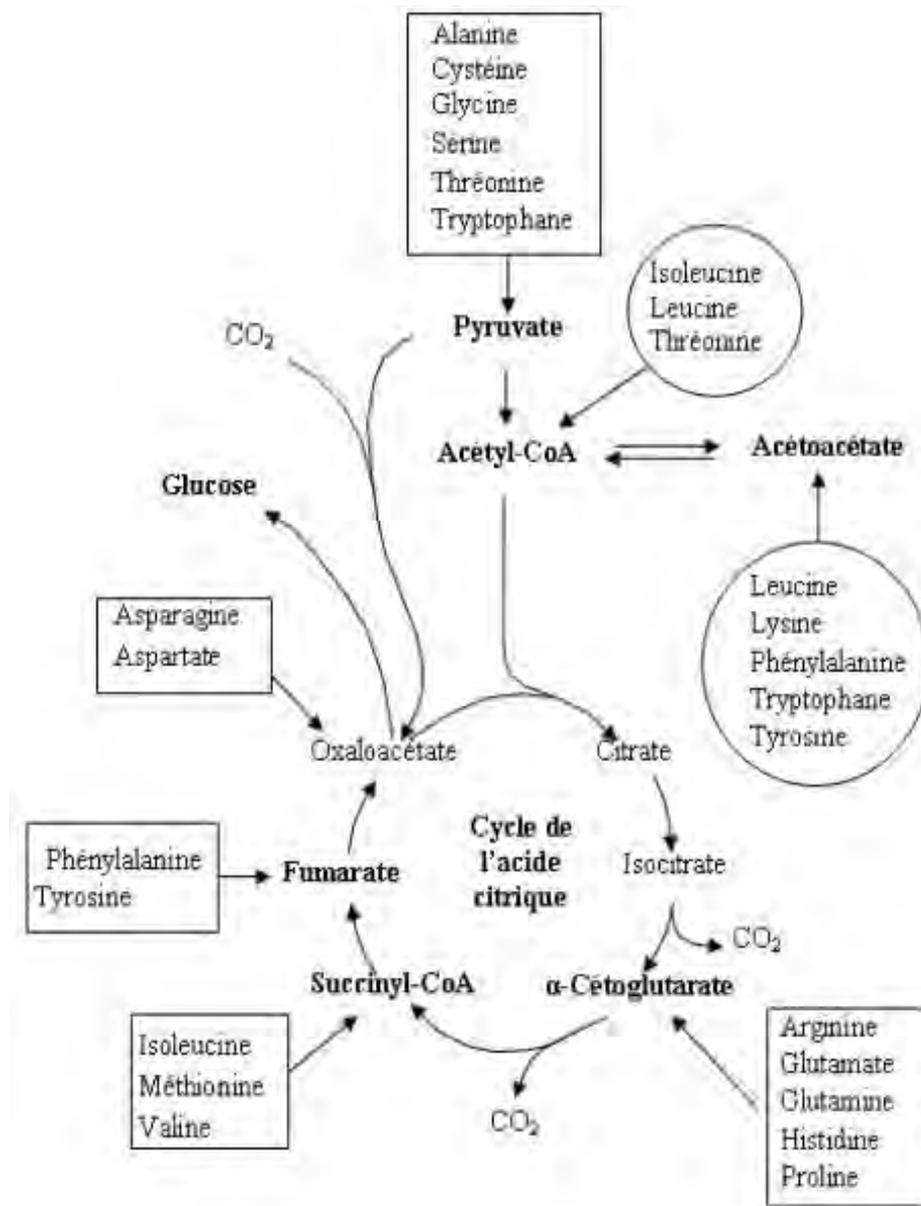


Figure 16 : Acides aminés glucoformateurs (dans les carrés) et acides aminés cétoformateurs (dans les cercles) susceptibles de fournir de l'énergie dans la filière aérobie, par Tiré de Voet et Voet 1998. Certains acides aminés sont glucoformateurs et cétoformateurs.

La protéolyse pour la production d'énergie lors d'un effort musculaire est un processus qui sera utilisé par l'organisme lors d'effort long et de forte déplétion en glucose. En effet, les protéines jouent un rôle structurel et fonctionnel majeur et leur utilisation pour la production d'énergie se fera au détriment de l'organisme.

D'un côté les acides aminés glucoformateurs qui pourront être désaminés au niveau du foie pour produire du pyruvate directement ou du glucose qui sera lui même transformé en pyruvate. De l'autre, les acides aminés cétoformateurs pourront être convertis en corps cétoniques par la cétogénèse. La désamination des acides aminés libère des groupements aminés qui sont convertis en ammoniacque puis en urée qui sera éliminée dans les urines.

B.2. Consommation maximale d'oxygène (VO₂ max) et les filières énergétiques en fonction du type d'effort (endurance ou résistance)

L'effort physique est la réalisation d'une activité qui met en œuvre des ressources physiques. Selon l'OMS, « Tout mouvement produit par les muscles squelettiques, responsable d'une augmentation de la dépense énergétique » correspond à l'effort physique. Il existe différents types d'efforts physiques qui vont faire intervenir différentes filières énergétiques :

- L'effort en exercice de force maximale : il s'agit d'un effort qui combine vitesse d'exécution et puissance maximale. Exemple : sprint 100 mètres, force athlétique.

- L'effort en exercice de résistance : effort d'une durée comprise entre 15 secondes et 2 minutes, il s'agit d'un effort intense et lors d'accélération soutenues. Exemple : sprint 200, 400 et 800 mètres, sprint en natation.

- L'effort en exercice d'endurance : il s'agit d'un effort où l'on maintient un exercice physique d'une intensité relative sur une durée prolongée. L'intensité de l'effort est ici modérée. Exemple : marche, 10000 mètres, marathon, triathlon, ski de fond.

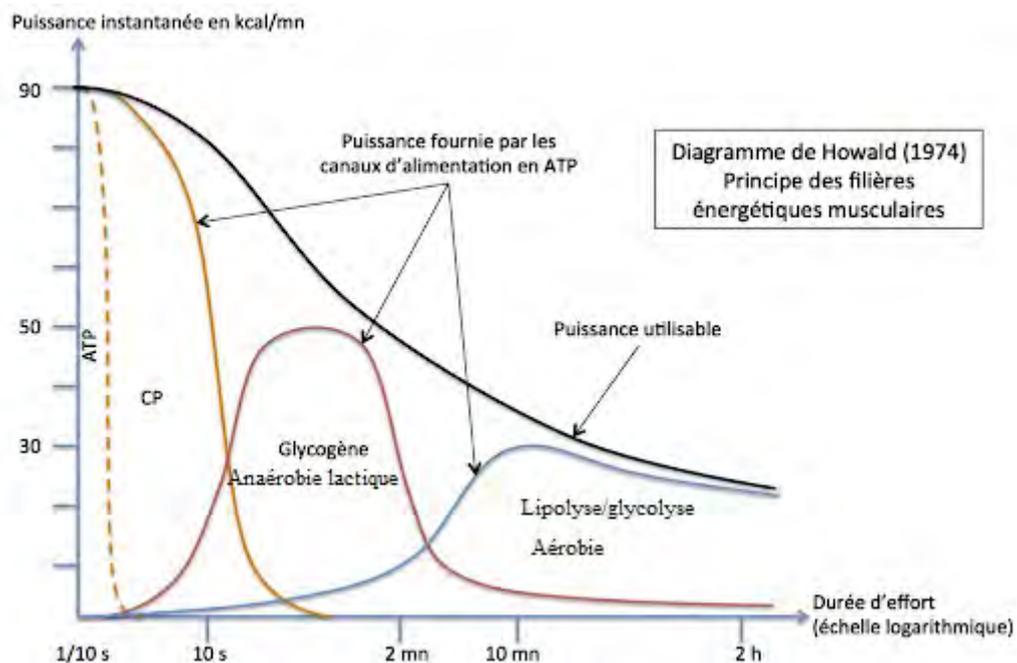


Figure 17 : Courbe de Howald 1974. CP : Filière anaérobie alactique (phosphocréatine). ATP : Réserve d'ATP dans la cellule musculaire.

Selon la courbe de Howald, nous pouvons voir qu'au delà de 10 secondes d'effort les trois filières sont impliquées mais dans des proportions différentes.

B.2.1. Effort en exercice de force maximale

Nous pouvons voir selon la courbe d'Howald (figure 17) que la puissance maximale lors d'un exercice de force maximale utilise exclusivement les réserves en ATP disponibles dans la cellule musculaire et la filière anaérobie alactique. Au delà de 15 secondes d'effort, cette filière ne peut plus fournir d'énergie. Cette filière fonctionne en l'absence d'O₂, sans production de lactate, et, est immédiatement disponible. Par contre les réserves en ATP cellulaire et en phosphocréatine sont limitées. Ce système peut fournir de l'énergie lors d'efforts intenses mais brefs, ce qui implique son utilisation dans les efforts du type sprint de moins de 100 mètres.

B.2.2. Effort en exercice de résistance

Au delà de 15 secondes d'effort, on note que la puissance maximale disponible baisse

(figure 17). L'intensité de l'effort est encore important et il va solliciter une autre filière énergétique : l'anaérobie lactique. Cette filière peut fonctionner en l'absence d'O₂ et peut être mise à contribution rapidement.

Ce métabolisme est surtout utilisé pour les exercices intenses d'une durée de 15 secondes à 2 minutes, comme par exemple lors de sprints de 400 ou 800 mètres. Cette filière va consommer du glycogène présent dans le muscle. La consommation de glycogène en l'absence d'O₂ va s'accompagner de formation de lactate. L'accumulation du lactate est un facteur limitant de cette filière, en effet le lactate va s'accumuler dans le sang et les tissus et provoquer une diminution de pH. Cette acidité va avoir des effets néfastes sur la contractibilité musculaire et par conséquent une diminution progressive de la puissance disponible. Au delà de 2 min d'effort intense, la puissance chute et la proportion d'énergie fournie par la filière anaérobie lactique chute également.

B.2.3. Effort en exercice d'endurance

Au delà de 2 min et majoritairement à partir de 10 min d'effort, la filière aérobie devient proportionnellement la plus importante pour la fournir de l'ATP. L'exercice d'endurance est un effort de longue durée et d'intensité modérée. Cette filière aérobie a besoin d'O₂ pour son fonctionnement. La respiration et la fréquence cardiaque s'accroissent pour permettre un transport accru d'O₂ aux muscles. Le glucose provenant des muscles, du sang et du foie peut-être oxydé totalement pour une libération maximale d'ATP. La lipolyse participe également dans cette filière à fournir de l'ATP, la métabolisation des acides aminés pour fournir de l'ATP dans la filière aérobie ne se fera qu'en cas d'effort de très longue durée ou en cas de déplétion forte en glycogène.

Le facteur limitant de la filière aérobie qui présente des réserves (acide gras, glucose, acides aminés) très importantes, est l'apport en oxygène aux cellules sollicitées pendant l'effort musculaire. Ce défaut peut intervenir à plusieurs niveaux :

- Le facteur pulmonaire : c'est la quantité maximale d'oxygène que peut contenir et absorber les poumons du sportif.
- Le facteur circulatoire : c'est le débit sanguin maximal que peut atteindre un sportif.
- Le facteur tissulaire : c'est la capacité maximale que possède une cellule musculaire à utiliser l'O₂.

Cette dimension de besoin en O₂ qui peut être amenée à être un facteur limitant dans

la filière aérobie va limiter la puissance disponible pour le sportif. L'énergie maximale fournie par la filière aérobie dépendra de l'âge, de l'entraînement du sportif, de la forme, de l'hydratation et du sexe du sportif. Cette filière aérobie pourra fournir de l'énergie pendant une longue durée mais avec une puissance faible.

La puissance maximale que va pouvoir développer la filière aérobie d'un sportif est la VO_2 max ou la consommation maximale d'oxygène.

B.2.4. Consommation maximale d'oxygène ou VO_2 max

Au repos, l'organisme consomme de l' O_2 . Lors d'un effort de longue durée la consommation en O_2 augmente en fonction de la puissance délivrée par les muscles. La VO_2 correspond au volume d' O_2 utilisé lors de l'effort (exprimé en mL/min/kg). Pour chaque sportif, il existe une valeur maximale de cette VO_2 , c'est la VO_2 max. La VO_2 max est le pic de consommation d'oxygène lors d'un exercice d'endurance. C'est un indicateur de la capacité du sportif à réaliser un effort d'endurance, plus elle est élevée plus la puissance délivrée lors de cet effort d'endurance sera importante.

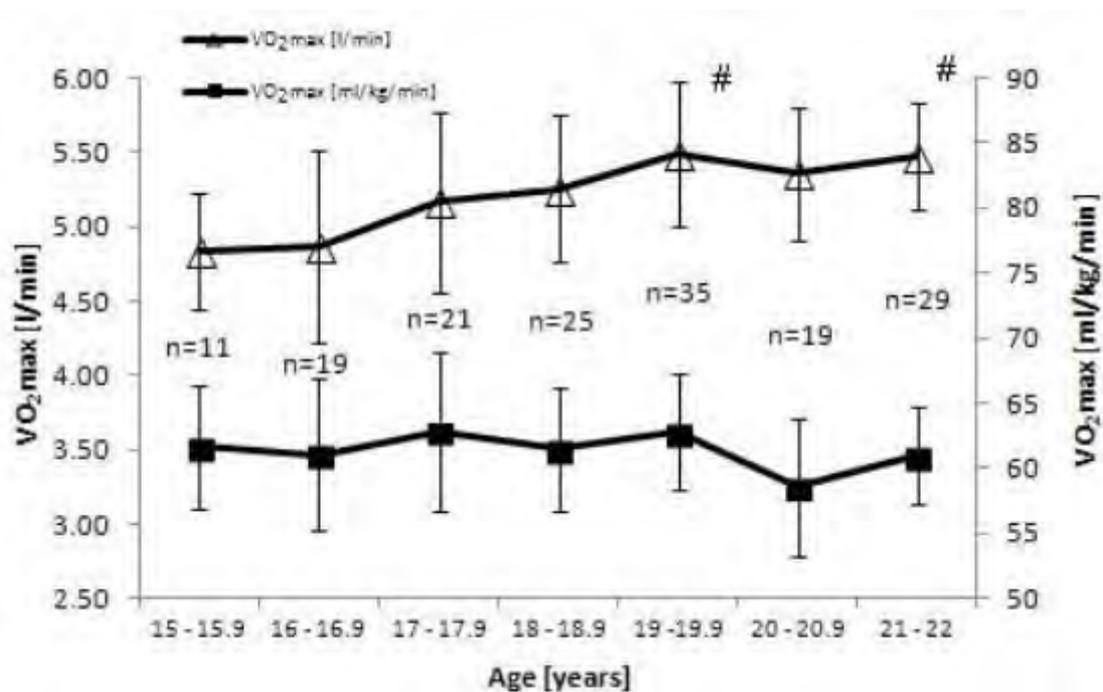


Figure 18 : Consommation maximale d'oxygène (VO_2 max) chez les pratiquants d'aviron Polonais en fonction de l'âge [94].

Ce schéma permet de mettre en évidence que la valeur de la VO_2 max varie suivant le

sexe, l'âge, le niveau d'entraînement. Pour un sujet sédentaire sain, la valeur de la VO_2 max est comprise entre 35 et 45 mL/min/kg tandis que pour un sujet sportif de très haut niveau la valeur peut dépasser les 90 mL/min/kg.

B.3. Références nutritionnelles en micronutriments établies par l'ANSES (2021)

Les termes employés ont changé de définition, ils ont été harmonisés par l'ANSES. Cette harmonisation s'est fondée sur une meilleure caractérisation du socle scientifique (type et qualité des données). Ainsi, les termes relatifs aux références nutritionnelles, c'est à dire le Besoin Nutritionnel Moyen (BNM), la Référence Nutritionnelle pour la Population (RNP), l'Apport Satisfaisant (AS), les Intervalles de Référence (IR) et enfin les Limites Supérieures de Sécurité (LSS) ont été définis et sont les suivants [71] :

- Besoin Nutritionnel Moyen (BNM) : Besoin quotidien moyen au sein de la population, tel qu'estimé à partir de données individuelles d'apport en relation avec un critère d'adéquation nutritionnelle lors d'études expérimentales.
- Référence Nutritionnelle pour la Population (RNP) : Apport quotidien qui couvre le besoin de presque toute la population considérée, tel qu'estimé à partir des données expérimentales. La RNP est calculée à partir de l'estimation des paramètres de la distribution du besoin. Le plus souvent la RNP est estimée à partir du BNM auquel on ajoute deux écarts-types, pour déterminer ainsi l'apport qui couvre le besoin de 97,5 % de la population. L'écart-type étant le plus souvent estimé à 15 % du BNM, la RNP vaut alors 1,3 fois le BNM. Cette définition est consensuelle dans le monde. Elle correspond à celle de l'ancien terme « apport nutritionnel conseillé », ANC, qui était également utilisé par extension pour différents types de références nutritionnelles. Dans un souci de clarté, le terme d'ANC a été abandonné au profit de RNP et de deux nouveaux types de références nutritionnelles : l'apport satisfaisant et l'intervalle de référence.
- Apport satisfaisant (AS) : Apport quotidien moyen d'une population ou d'un sous-groupe pour lequel le statut nutritionnel est jugé satisfaisant. L'AS est la référence nutritionnelle retenue : quand le BNM et donc la RNP ne peuvent pas être estimés faute de données suffisantes, ce qui correspond à la définition de l'« adequate intake (AI) » ; ou quand la valeur de RNP peut être estimée mais n'est pas jugée satisfaisante au regard d'observations de population à long terme établissant que cette RNP ne permet pas de satisfaire des critères de santé qui seraient plus pertinents que les

critères utilisés pour estimer le BNM. Ainsi, contrairement à l'AI, l'AS n'est pas seulement envisagé comme substitut de la RNP dans le cas où l'on ne pourrait pas le calculer. Cette définition tient compte aussi du fait que l'on dispose de plus en plus de données concernant les relations entre l'apport et la modulation du risque de pathologie à long terme.

- Intervalle de Référence (IR) : Intervalle d'apports considérés comme satisfaisant pour le maintien de la population en bonne santé. Il s'agit d'une référence nutritionnelle spécifique aux macronutriments énergétiques, exprimée en pourcentage de l'apport énergétique total.
- Limite Supérieure de Sécurité (LSS) : Apport journalier chronique maximal d'une vitamine ou d'un minéral considéré comme peu susceptible de présenter un risque d'effets indésirables sur la santé de toute la population.

B.3.1. Références nutritionnelles en vitamines

Tableau 3 : Récapitulatif des références nutritionnelles en vitamines pour les hommes adultes de 18 ans et plus [71] :

Vitamines	BNM	RNP	AS	LSS
Vitamine A (µg/j)	580	750		3000
Vitamine D3 (µg/j)			15	100
Vitamine E (mg/j)			10	ND
Vitamine C (mg/j)	90	110		ND
Vitamine B1 (mg/MJ)	0,072 mg/MJ d'énergie consommée	0,1 mg/MJ d'énergie consommée		ND
Vitamine B2 (mg/j)	1,3	1,6		ND
Vitamine B3 (mg EN/MJ)	1,3 mg EN/MJ Soit 14,4 mg/j	1,6 mg EN/MJ Soit 17,4 mg/j		10 (a. nicotinique) 900 (nicotinamide)
Vitamine B6 (mg/j)	1,5	1,7		25

Vitamine B8 (µg/j)			40	ND
Vitamine B9 (µg/j)	250	330		1000
Vitamine B12 (µg)			4	ND
Vitamine B5 (mg/j)			6	ND
Vitamine K (µg/j)			79	ND
Choline (mg/j)			400	ND

*ND = non défini, les données disponibles n'ont pas permis de fixer un seuil de toxicité.

B.3.2. Références nutritionnelles en minéraux

Tableau 4 : Récapitulatif des références nutritionnelles en minéraux pour les hommes adultes de 18 ans et plus [71] :

Minéraux	BNM	RNP	AS	LSS
Calcium (mg/j) Hommes 25 ans et plus	750	950		2500
Chlore (mg/j)			2300	ND
Cuivre (mg/j)			1,9	5
Fer (mg/j)	6	11		ND
Fluor (mg/j)			3,4	7
Iode (µg/j)			150	600
Magnésium (mg/j)			380	250
Molybdène (µg/j)			95	600
Phosphore (mg/j) 1			550	ND
Potassium (mg/j)			3500	ND

Sélénium (µg/j)			70	300
Sodium (mg/j)			1500	2300
Zinc (mg/j)	11	14		25

***ND = non défini, les données disponibles n'ont pas permis de fixer un seuil de toxicité.**

B.4. Références nutritionnelles pour les besoins énergétiques

L'estimation du besoin énergétique suppose de connaître le besoin énergétique basal du métabolisme. Il a été retenu par l'ANSES dans le rapport (ANSES 2017d) les besoins suivants :

- Pour les hommes de 18 à 69 ans d'un IMC de 22 : 2600 kcal/j.
- Pour les femmes de 18 à 59 ans d'un IMC de 22 : 2100 kcal/j.

IMC = Indice de masse corporelle = masse corporelle (kg) / taille (m).

B.5. Références nutritionnelles en macronutriments énergétiques pour les hommes et les femmes adultes

Ces références ont pour but de proposer des recommandations sous forme d'intervalles de consommation de chaque macronutriments exprimés en pourcentage de l'AET (Apport Énergétique Total). Ces références prennent en considération le caractère indispensable de certains de ces macronutriments (acides aminés et acides gras indispensables). Ils correspondent à l'apport qui permettra de diminuer le risque de surpoids, de désordres métaboliques et de maladies chroniques.

- Les glucides doivent principalement provenir de féculents (céréales, légumineuses, tubercules) qui contiennent majoritairement des sucres dit complexes, à l'opposé, la part des sucres dits simples présents dans les aliments raffinés, doit être limitée.

- La consommation lipidique globale est à limiter car ils possèdent un pouvoir calorifique important. Il existe une répartition des acides gras souhaitable. En effet, il est préférable pour une bonne santé du système cardio-vasculaire de privilégier les acides gras dits insaturés et de rationner les acides gras saturés.

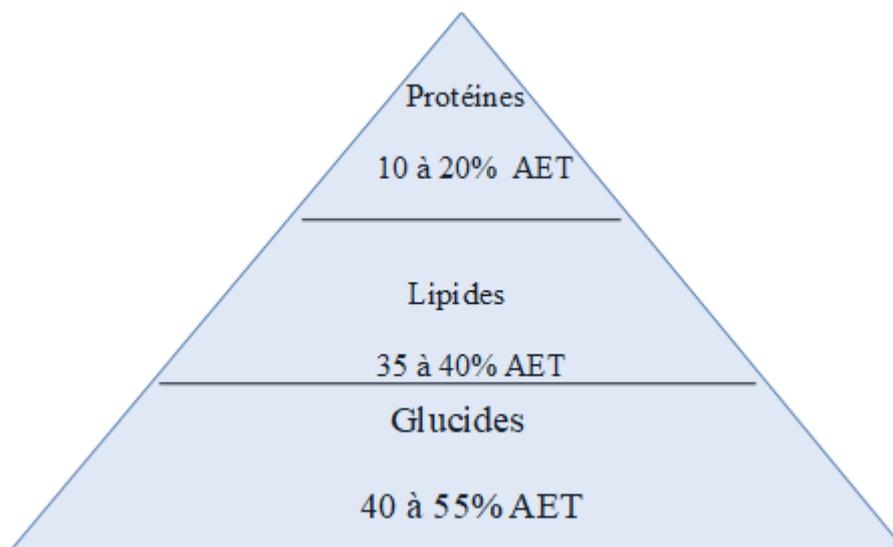
Tableau 5 : Récapitulatif des références nutritionnelles en macronutriments énergétiques pour les hommes et les femmes adultes [8] :

Macronutriments	IR		AS	Niveau d'apport maximal
	Limite basse	Limite haute		
Protéines (% AET)	10	20		
Lipides (% AET)	35	40		
Acides gras saturés totaux (% AET)				12
Acides laurique + myristique + palmitique (% AET)				8
Acide linoléique (% AET)			4	
Acide α -linoléique (% AET)			1	
EPA + DHA (mg)			500	
Glucides (% AET)	40	55		
Sucres totaux hors lactose (g)				100
Fibres (g)			30	

AET : apport énergétique total ; AS : apport satisfaisant ; IR : intervalle de référence.

Ce tableau amène une notion d'équilibre alimentaire, familièrement appelé « bien manger ». Le principe qui en ressort, est une répartition « équilibrée » entre les nutriments et qu'ils assurent la couverture des besoins. Mais aussi que le régime alimentaire soit également adapté à un état de santé global sain pour un individu adulte moyen.

L'équilibre alimentaire préconisé sur des bases scientifiques est le suivant : il est formulé sur la base d'une répartition des macronutriments exprimée en pourcentage de l'apport énergétique global. Ainsi selon l'ANSES, nous pouvons définir la répartition des macronutriments pour un individu moyen selon le graphique suivant :



AET : Apport énergétique total.

Pour les personnes ayant une dépense énergétique faible à modérée (NAP = 1,4 à 2 ou NAP = 1 = Métabolisme de base) selon l'ANSES, il n'est pas nécessaire de changer l'équilibre des apports en macronutriments [9].

B.6. Nutriments et performance musculaire

B.6.1. Les glucides

D'après l'ANSES, il est important de clarifier la terminologie qui est utilisée pour catégoriser les glucides [9] :

- Les glucides complexes sont des oligosaccharides ou des polysaccharides. Les polysaccharides tel que l'amidon ont une structure complexe composée d'unités de D-glucose reliées entre elles par des liaisons α (1-4 ou 1-6). Ces propriétés vont diminuer le pic glycémique et améliorer la réponse glycémique. On parle d'index glycémique (IG) pour mesurer la réponse physiologique à un apport oral de glucides (IG du glucose = 100, IG des pâtes alimentaires = 50 à 60), plus il est élevé, plus le pic glycémique sera important.
- Les glucides simples sont composés des monosaccharides et des disaccharides (saccharose, glucose et fructose).

Les dépenses énergétiques sont fonction de l'activité physique de chaque individu, de son poids et de sa taille, mais aussi de l'âge et de son sexe. Les glucides étant une source d'énergie, l'apport en glucides devra être adapté en fonction de l'intensité de l'effort, de sa durée et du poids de l'individu.

Les glucides sont stockés dans les muscles et le foie sous forme de glycogène chez l'homme, il s'agit d'un polymère de glucose. Selon les résultats de Karlsson et Saltin, la consommation en glucose du muscle entraîne l'épuisement du glycogène musculaire après 90 minutes d'exercice à 75 % de la VO_2 max ou après 4 h à 55 % de la VO_2 max, ce sont des efforts en exercice d'endurance donc de puissance modérée. Les glucides sont les substrats privilégiés par l'organisme pour fournir de l'énergie lors des efforts intenses et prolongés [10].

Selon l'ANSES, un apport de 7 à 8 g/kg/j de glucides couvre les besoins énergétiques chez un pratiquant occasionnel. L'apport peut-être augmenté jusqu'à 10 g/kg/j chez le sportif d'endurance entraîné. Les sucres simples doivent être limités (ANSES : actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles, Décembre 2016), la limite supérieure de 100 g/j de sucres simples (hors lactose) ne doit pas être dépassée dans un régime alimentaire équilibré [9].

B.6.2. Les lipides

Chez l'homme la masse totale du tissu adipeux représente 15 à 20 % du poids total, pour la femme c'est entre 20 et 25 %. Chez des sujets entraînés des pourcentages de l'ordre de 6 % ont pu être mis en évidence.

Les acides gras sont essentiels car, chez le sportif on observe une oxydation des acides gras supérieure par rapport au sujet sédentaire, afin d'épargner le substrat électif qu'est le glucose. Les acides gras dans l'organisme sont stockés sous forme de triglycérides, c'est la lipogénèse. La lipolyse permet la libération des acides gras non estérifiés et le glycérol. Les acides gras circulent dans le sang grâce à l'albumine à laquelle ils sont liés [11].

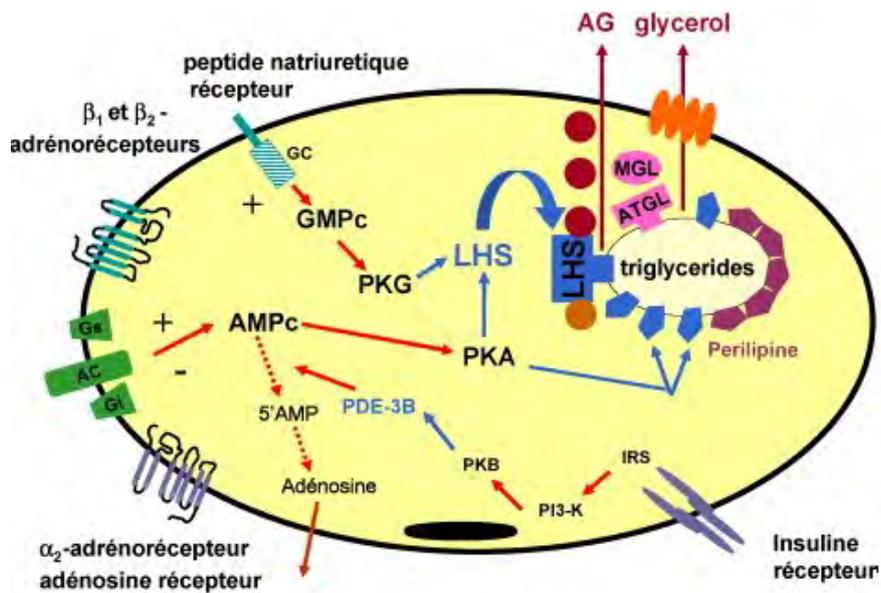


Figure 19 : La lipolyse adipocytaire d'après I. de Glisezinski. Adipose tissue lipid mobilisation during exercise. Science et Sports, December 2007. MGL : lipase des monoglycérides. ATGL : L'adipose triglycéride lipase. AG : acides gras.

La lipolyse est contrôlée par une enzyme, la lipase hormono sensible (LHS). La LHS pour être active, a besoin d'être phosphorylée par une protéine kinase (PKA), elle-même activée par l'AMPc (adénosine monophosphate cyclique) dont la production dépend de l'activation des récepteurs β_1 et β_2 (activation de la lipolyse), à l'opposé les récepteurs α_2 (inhibition de la lipolyse) quand ils sont activés diminuent l'AMPc. Lorsque les catécholamines sont présents en grande quantité ce sont les récepteurs β -adrénergiques qui sont activés et à contrario, quand la concentration en catécholamines est basse, ce sont les récepteurs α -adrénergiques qui sont activés. C'est la concentration en catécholamines qui déterminera l'équilibre entre lipolyse et lipogénèse. L'insuline participe également à cet équilibre, l'activation du récepteur à insuline sur l'adipocyte diminue l'AMPc et entraîne une baisse de la lipolyse. Enfin les peptides natriurétiques exercent un puissant effet lipolytique sur l'adipocyte via la production de GMPc (guanosine monophosphate cyclique) qui active la protéine kinase dépendant du GMPc (PKG).

L'augmentation des catécholamines et la diminution de l'insulinémie durant l'exercice physique favorisent donc la lipolyse et la libération des acides gras comme substrat énergétique. Pour des intensités d'exercices de 25 à 65 % de la VO_2 max (exercices

d'endurance d'intensité faible à modérée), l'augmentation de la lipolyse est régulière. Cependant, pour des efforts plus intenses cette augmentation proportionnelle de la lipolyse n'est plus vraie [12].

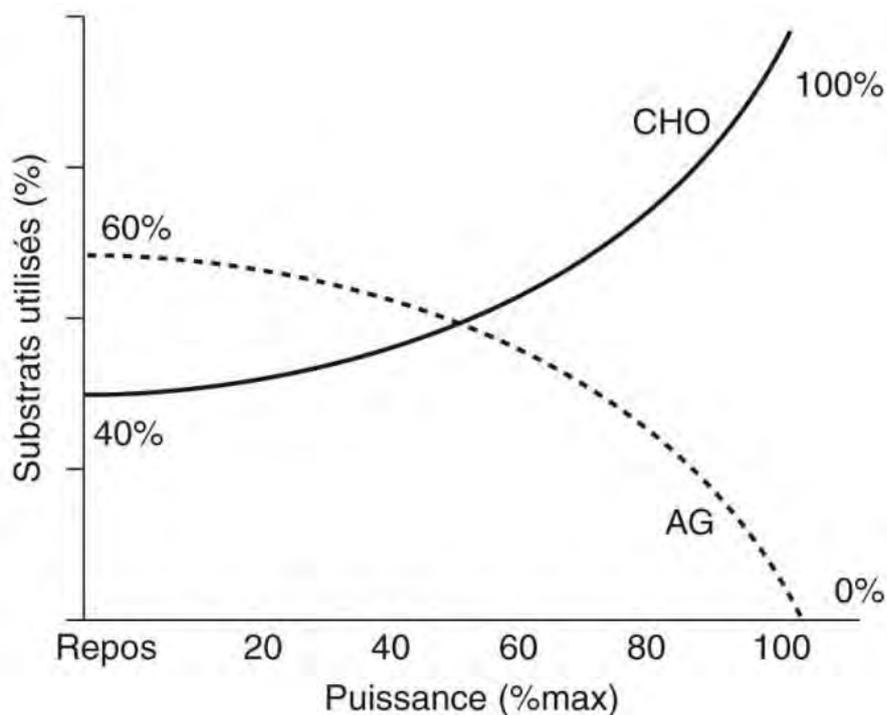


Figure 20 : D'après Brooks et Mercier, le principal facteur influençant la lipolyse est l'intensité de l'exercice. Au repos, le degré d'oxydation des acides gras est très élevé mais la dépense énergétique est faible, la quantité totale d'acides gras oxydés est donc peu importante. Plus l'intensité de l'exercice augmente plus le pourcentage d'oxydation des acides gras baisse, mais la dépense énergétique elle augmente proportionnellement, le métabolisme utilise de plus en plus de glucose (CHO). Le débit maximal d'oxydation des acides gras se situe entre 25 et 65 % de la VO_2 max. Il s'agit du phénomène de cross-over. AG = acides gras. CHO = carbohydate [13].

- Les lipides sont donc utilisés principalement dans les efforts modérés de longue durée.

Selon l'ANSES, les lipides sont des macronutriments très énergétiques (1 g = 9 kcal). Même si les dépenses énergétiques chez le sportif peuvent être augmentées, les apports lipidiques chez le sportif ne doivent pas excéder 35 % de l'apport énergétique total et

idéalement se situer entre 30 et 35% de l'AET. Toujours selon l'ANSES, la plupart des expérimentations n'ont pas permis de mettre en évidence qu'un régime hyperlipidique avait un effet bénéfique sur les performances. Au niveau de l'aspect qualitatif des acides gras, il est conseillé par l'ANSES que l'apport lipidique soit constitué d'un tiers d'acides gras saturés, d'un tiers d'acides gras monoinsaturés et d'un tiers d'acides gras polyinsaturés [9].

B.6.3. Les protéines

Les recommandations quant aux besoins nutritionnels en protéines chez le sportif sont les suivantes :

- Selon l'INSEP (institut national du sport, de l'expertise et de la performance), pour les sportifs d'endurance ayant un régime alimentaire qui permet le maintien de leur poids corporel et s'ils adoptent des pratiques nutritionnelles saines, ils sont peu exposés aux carences en protéines. On peut considérer que 1,2 à 1,4 g/kg/j de protéines couvrent les besoins selon l'INSEP.[62] Pour maintenir le poids de forme chez un sportif de force, on recommande la prise de 1,3 à 1,5 g/kg/j. Cet apport peut être porté jusqu'à 2 g/kg/j (sans dépasser 2,5 g/kg/j pendant 3 mois) lorsque le sportif est dans un programme de prise de force (gain de masse maigre) [14][28].

- Selon l'ANSES, l'intérêt d'apports de protéines de haute qualité biologique (caséine, protéines de lactosérum) en quantité raisonnable (20-25 g de protéines par prise) en récupération d'exercices musculaires est admis (selon les auteurs ; Hartman et al 2007, Hulmi et al 2009, Tang et al 2009.). Cet apport de protéines en supplément de l'alimentation devrait être réservé aux travailleurs de force aux dépenses énergétiques élevées et dont les performances sont liées à leur masse musculaire, tout en ne dépassant pas un apport de protéines maximal correspondant à 20 % de l'AET [9].

Nous abordons à la suite le cas d'acides aminés qui sont parfois utilisés par les fabricants dans les aliments diététiques de l'effort.

B.6.4. La créatine

La créatine est un acide aminé qui joue un rôle important dans le transport de l'énergie dans les cellules musculaires. Elle est synthétisée dans le foie, le pancréas et les reins à partir de la glycine et de l'arginine :

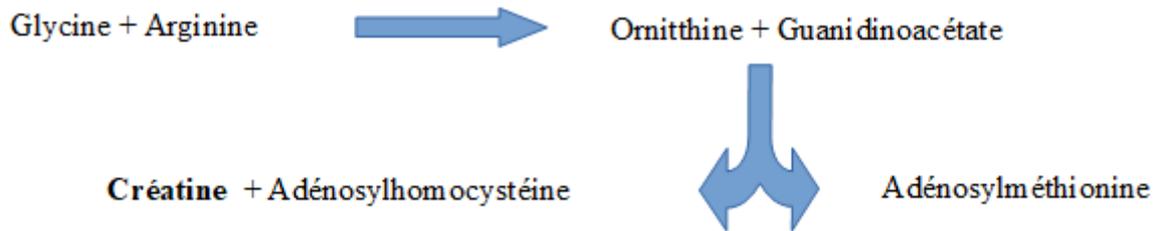


Figure 21 : Synthèse endogène de la créatine dans l'organisme à partir d'acides aminés [97].

Le corps renouvelle en permanence son stock de créatine, à hauteur de 2g/J pour un individu de 60 kg [15]. La majeure partie (95%) de la créatine est stockée dans les muscles squelettiques. Pour information, 100 grammes de viande rouge contient 0,5 gr de créatine.

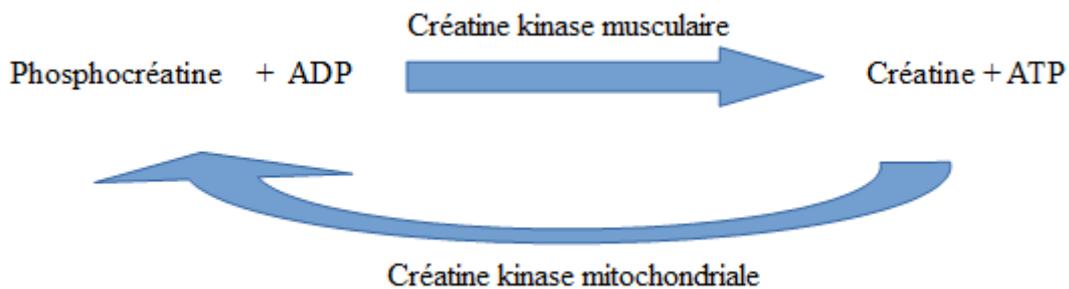


Figure 22 : Déphosphorylation de la phosphocréatine [97].

Une fois dans le muscle, et sous l'action de la créatine kinase mitochondriale la créatine se lie au phosphate quand le muscle est au repos (phosphocréatine formée). A l'effort, elle est alors disponible pour être catalysée par la créatine kinase musculaire : la réaction

synthétise un ATP (adénosine triphosphate = nucléotique énergétique). L'ATP est une source d'énergie immédiatement disponible pour le muscle [16]. La créatine provoque une rétention d'eau musculaire ce qui peut-être momentanément perçu comme une augmentation du volume musculaire. La créatine améliore seulement la performance des muscles lors d'effort en anaérobie, elle est donc inefficace pour les sports d'endurance. Son efficacité se limite aux premières minutes de l'effort [17]. Il est important de souligner que son élimination est essentiellement rénale.

Selon l'ANSES (l'évaluation des risques présentés par la créatine pour le consommateur – Véracité des allégations relatives à la performance sportive ou à l'augmentation de la masse musculaire. 23/01/2001), la dose maximale journalière recommandée pour la créatine est de 3 gr/j. Lors de l'ingestion de 3 gr de créatine, toujours selon l'ANSES, 40 à 70 % de la créatine non fixée par les muscles, est éliminée dans les urines. La bonne hydratation de l'organisme est nécessaire lors de l'utilisation de créatine, afin d'assurer une fonction rénale optimale et une bonne élimination de la créatine. Il n'existe pas de références nutritionnelles car la créatine peut être synthétisée par l'organisme, et sa production endogène répond parfaitement aux besoins chez l'homme sain [18].

L'EFSA a reconnu en 2017, qu'une consommation de 3 gr/j de créatine pouvait renforcer la musculature des personnes âgées de plus de 55 ans pratiquant au moins trois fois par semaine un sport de résistance comme la musculation. L'EFSA a par contre interdit pour les aliments et compléments alimentaires contenant de la créatine, les allégations suivantes [73] :

- Favoriser l'accumulation de créatine dans les muscles.
- Augmenter les capacités d'endurance.
- Augmenter le volume musculaire.
- Augmenter les capacités d'attention et de concentration, la vivacité mentale, la mémorisation d'informations ou le maintien de la mémoire, y compris chez les personnes âgées.

En conclusion, au vu des recommandation de l'ANSES et l'EFSA la créatine ne doit pas être recommandée chez le sportif, même de haut niveau.

B.6.5. La carnitine

La carnitine est synthétisée par le foie et le coeur à partir de la lysine et de la méthionine, c'est une amine quaternaire. Dans les tissus, nous retrouvons les deux énantiomères, les formes D- et L-, mais seule la forme L- est biologiquement active. La carnitine a un rôle important dans le métabolisme des acides-gras, elle transporte les acides-gras à longue chaîne au travers des membranes mitochondriales [19].

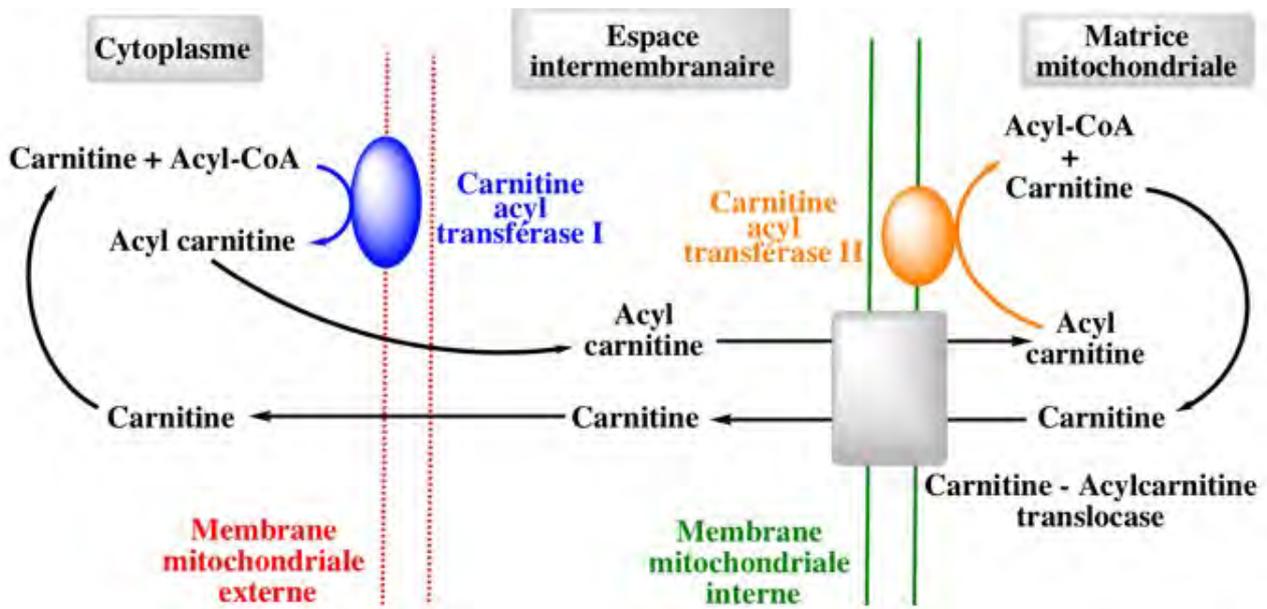


Figure 23 : Mécanisme biochimique de la carnitine d'après E. Jaspard (2013, Université Angers/Biochimie).

D'après E. Jaspard (2013, Université Angers/Biochimie), les acides gras à longue chaîne (Acyl-CoA) ne peuvent pas traverser la membrane mitochondriale, la L-carnitine sous l'action de la carnitine acyl transférase I est fixée à l'acyl-CoA. L'acylcarnitine peut alors traverser la barrière mitochondriale grâce à la carnitine acylcarnitine translocase. Une fois dans la matrice mitochondriale, l'acyl-CoA est libéré grâce à la carnitine acyl transférase II. La carnitine libre retourne dans le cytosol par l'intermédiaire de la carnitine acylcarnitine translocase. L'acyl-CoA est alors disponible pour la β -oxydation, et il sera utilisable pour produire de l'énergie par l'intermédiaire du cycle de Krebs.

En raison de son rôle physiologique, il a été suggéré que l'apport oral de L-carnitine pouvait améliorer les performances des sportifs en favorisant la disponibilité des acides gras libres pour la production d'énergie épargnant ainsi les réserves en glycogène. Egalement, il a été émis l'hypothèse que la L-carnitine est susceptible de réduire la masse grasse.

Aujourd'hui, l'ensemble des résultats publiés à ce jour, démontrent l'absence d'effets de la L-carnitine sur les effets hypothétiques émis précédemment [19].

B.6.6. La glutamine

La glutamine est un acide aminé, elle peut être synthétisée par l'organisme (au niveau des tissus périphériques) à partir de l'acide glutamique grâce à la glutamine synthétase, cela fait de lui un acide aminé non essentiel. C'est l'acide aminé le plus abondant de l'organisme.

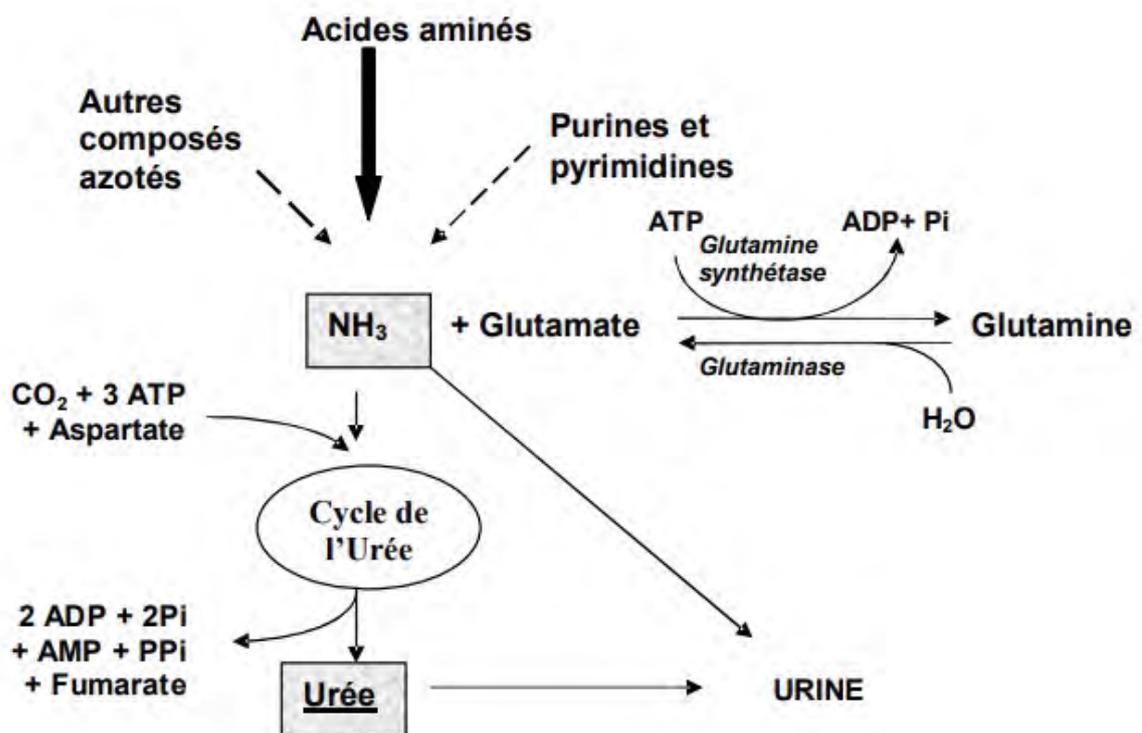


Figure 24 : Métabolisme de la glutamine et cycle de l'urée.

Les composés azotés (ammoniac ou NH_3) produits par le catabolisme des acides aminés dans les différentes cellules de l'organisme sont fixés par transamination sur le glutamate par

la glutamine synthétase. La glutamine produite porte deux atomes d'azote et peut circuler dans le sang librement. La glutamine peut-être métabolisée par le foie. Dans le foie sous l'action de la glutaminase, la glutamine libère l'ammoniac qui peut être pris en charge par le cycle de l'urée. L'urée est libérée dans la circulation sanguine et pourra être éliminée par les reins dans les urines.

D'après une étude, (Changes in glutamine and glutamate concentrations for tracking training tolerance. Med Sci Sports Exerc 2000), la tolérance d'un athlète à l'entraînement est corrélée avec le taux de glutamine et de glutamate. En effet, cette étude affirme que la glutamine améliore la récupération et la reconstruction musculaire après un effort intense ou dans le cadre d'un surentraînement, notamment, en augmentant l'activation de la glycogène synthétase, en favorisant l'élimination des déchets azotés et en jouant le rôle d'un antioxydant indirect (favorise la synthèse du glutathion) [74]. Aujourd'hui encore, on continue de se poser des questions quant à l'utilisation excessive de la glutamine. Elle pourrait se révéler potentiellement néfaste sur l'organisme. Les publications et études manquent sur le domaine, néanmoins une récente étude ([*LRH-1-dependent programming of mitochondrial glutamine processing drives liver cancer*](#). P. Xu. 2016) a mis en évidence un rôle de la glutamine dans l'accélération et le développement des cellules cancéreuses du foie.

La glutamine est consommée par les sportifs, soit seule, soit en association avec d'autres nutriments. Les doses journalières conseillées par ces préparations à destination du sportif contenant de la glutamine varient de 3 g à plus de 15 g. La glutamine est consommée à la fois par les sportifs d'endurance et les sportifs de force [74].

Selon l'ANSES, un apport par voie orale ne permet pas d'augmenter significativement la quantité de glutamine dans les muscles squelettiques [20]. Plus de 90 % de la glutamine ingérée est captée par l'intestin, le foie et les reins [21]. Pour ces raisons, l'intérêt de la supplémentation en glutamine pour l'augmentation des performances musculaires est nulle.

B.6.7. La taurine

La taurine est un acide aminé que l'on retrouve de manière importante dans l'organisme, elle ne sert pas dans l'anabolisme protéique.

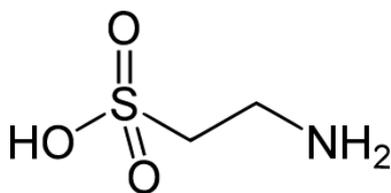


Figure 25 : Structure chimique de la taurine.

Elle est synthétisée dans le foie chez l'homme. De plus, l'alimentation assure un apport externe en particulier dans les aliments d'origine animale. La taurine va être retrouvée principalement au niveau du cœur, des muscles et dans le système nerveux central. Elle intervient au niveau de nombreux métabolismes : formation des sels biliaires utiles dans la digestion des lipides, stabilisation des membranes cellulaires. L'exposition journalière moyenne en taurine pour une alimentation omnivore est de 400 mg/j. La taurine est parfois ajoutée dans les aliments diététiques de l'effort pour ses effets supposés toniques sur le système cardiovasculaire et le système musculaire. Cependant, il est important de noter que la nutrivi-gilance a mis en avant des troubles cardiovasculaires liés à une consommation abusive de taurine dans les boissons énergisantes notamment [22].

Aucune étude ne permet à ce jour de montrer un effet sur l'amélioration des performances sportives lors de la prise de taurine selon un rapport de l'ANSES de 2017 [23].

B.7. Références nutritionnelles du sportif d'endurance (glucides et lipides)

Il est important de préciser que nous allons définir des valeurs moyennes des besoins nutritionnels mais présentant une logique. En effet, chaque individu présente des spécificités différentes : poids, tailles, patrimoine génétique, intensité de l'effort pratiqué dans le sport.

-Les besoins glucidiques du sportif d'endurance sont très variables suivant la durée et l'intensité de l'effort, selon l'ANSES ils peuvent varier de 3 à 10 g/kg/j (Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles. Décembre 2016.). Les glucides représentent 50 à 60 % de l'apport énergétique.

-Enfin les lipides doivent représenter environ 25 à 35% de l'apport énergétique, ce qui correspond entre 1 et 1,2 g/kg/j. Il existe plusieurs types d'acide gras et il est important de respecter une certaine proportion dans le choix des apports en acides gras.

Il existe trois grands types d'acide gras :

-Les acides-gras saturés comme par exemple : l'acide palmitique, l'acide myristique, l'acide laurique que l'on trouvera dans la viande, le beurre, l'huile de palme et l'huile de coco. Selon l'ANSES, ces acides-gras saturés sont les plus susceptibles d'entraîner une hausse de la cholestérolémie et du LDL cholestérol, ce qui peut favoriser l'apparition de pathologies cardiovasculaires. Ils sont également considérés comme non-essentiels car ils peuvent être synthétisés par notre organisme. D'autres acides-gras saturés, notamment ceux à chaînes courtes et moyennes n'ont pas cet effet et pourraient même avoir des effets positifs sur la santé, toujours selon l'ANSES.

-Les acides-gras mono insaturés comme par exemple : l'acide palmitoléique, l'acide oléique.

-Les acides-gras poly insaturés comme l'acide linoléique (LA) et l'acide linoléique (ALA) font partie des acides-gras indispensables, ils ne peuvent pas être synthétisés par le corps. Nous les retrouvons dans les huiles végétales comme l'huile de noix, l'huile de tournesol, l'huile de colza. A partir de ces acides-gras peuvent être synthétisés l'eicosapentaénoïque (EPA) qui possède de nombreuses propriétés physiologiques bénéfiques (antiarythmique et prévention de l'athérosclérose) et l'acide docosahexénoïque (DHA) qui possèdent également des propriétés physiologiques importantes. Le DHA rentre dans la composition des membranes cellulaires des neurones et des axones du cerveau qui est un organe très riche en lipides. Pour la DHA il faut toutefois un apport externe pour répondre à la totalité des besoins corporels, il est donc essentiel [27].

Tableau 6 : Proportion des différents acides gras dans l'alimentation selon l'ANSES [8] :

	Acide Gras	AS	Niveau d'apport maximal
AG non indispensables	AG saturés totaux		12 %
	Acide oléique	15 – 20 %	
	EPA	250 mg/jour	
AG indispensables	Acide linoléique	4%	
	Acide linoléique	1%	
	DHA	250 mg/jour	

AS : apport satisfaisant, AG : acide gras.

B.8. Références nutritionnelles du sportif de force (glucides et lipides)

La répartition des quantités en macronutriments chez les sportifs de force, diffère des sportifs d'endurance. En effet, les besoins énergétiques d'un coureur de fond et d'un haltérophile si on extrapole totalement, ne sont pas les mêmes. Il faut cependant garder des réserves pour des sports qui mêlent les deux types d'efforts comme par exemple le rugby ou la boxe. Chez les pratiquants de sports de force, le sportif peut vouloir réaliser une préparation spécifique dans le but d'une prise de masse musculaire. La prise de masse musculaire est une phase de préparation physique du sportif de force. On intégrera donc le sport de prise de masse au sport de force.

La répartition selon les recommandations de l'INSEP [14] :

- 25 à 30 % correspond à l'apport lipidique.
- 50 à 55 % correspond à l'apport glucidique [28].

PARTIE 2

Aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait préparés sous forme de préparation en poudre pour boisson riche en protéines.

L'alimentation doit permettre de couvrir l'ensemble des besoins nutritionnels. Il est possible pour un sportif, même de haut niveau, de subvenir totalement à ses besoins avec une alimentation riche et variée. De nos jours, le recours à des aliments diététiques de l'effort est de plus en plus fréquent dans le but d'arriver plus rapidement au bénéfice recherché : prise de masse ou augmentation de la performance sportive.

A. Les aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait préparés sous forme de préparation en poudre pour boisson riche en protéines

A.1. Présentation

Le lactosérum est issu du lait de vache. Premièrement, il faut savoir que le lait de vache est composé de deux fractions protéiques : une fraction micellaire (constituée de caséine), et une fraction soluble (composée de lactosérum). Le lait de vache est composé d'environ 30 g/L de protéines, et la proportion pour la fraction micellaire est de 65 à 70 % tandis que la portion de la fraction soluble est de 30 à 35 %. Les protéines de lactosérum restent solubles dans un milieu acide, au contraire les protéines micellaires vont précipiter. Le lactosérum est un produit largement abondant, issu de l'industrie fromagère, on peut produire 9 litres de petit lait (liquide contenant la fraction soluble) à partir de 10 litres de lait [30]. Le lactosérum n'est pas uniquement composé de protéines, il contient la plus grande partie de l'eau du lait, du lactose, des acides gras (phospholipides et triglycérides), de l'acide lactique et des minéraux : Ca, P, Na (**Tableau 7**) [75].

Tableau 7 : Composition d'un lactosérum après extraction acide [29] :

Eau	94,00%
Lactose	74 g/L
Protéines	12 g/L
Matière grasse	0,5 g/L
Acide lactique	1,8 g/L
Ca	1,80%
P	1,50%
Na	7,50%

A.2. Les caséines

On trouve dans le lait de vache plusieurs types de caséines [31]. Les caséines sont présentes sous la forme de micelles, elles-mêmes constituées de submicelles reliées entre elles par des ponts phosphocalciques (au sein de la submicelle dans la partie hydrophobe), les submicelles comportant des caséines κ , sont à la périphérie de la micelle (protuding peptide chain sur la figure 26). L'ensemble forme une micelle dont le diamètre moyen est d'environ 100 nm [29]. La micelle de caséine est stable au pH normal du lait (pH 6,8) et à température ambiante, mais quand il y a acidification du milieu, les protéines se gélifient. En effet, c'est la diminution de la charge globale des particules et l'ionisation des fonctions organiques qui entraînent la gélification par dissolution des ponts phosphocalciques. Cette propriété est utilisée par les sportifs qui cherchent une protéine à absorption lente.

Les différents types de caséines dans le lait de vache :

- Caséine α S1 : 40 % soit 10 à 13 g/L de lait, il s'agit d'une protéine qui renferme 39 % d'acides aminés dits essentiels.
- Caséine α S2 : 14 % soit 4 à 5 g/L de lait.
- Caséine β : 35 % soit 9 à 11 g/L de lait.
- Caséine κ : 10 % soit 3 g/L de lait, c'est elle qui assure à température ambiante et à pH 6,8 le maintien à l'état liquide.
- Caséine γ : la moins abondante. Elle est un produit de la protéolyse de la caséine β .

Deux modèles sont proposés à ce jour pour la structure physico-chimique de la micelle de caséine. Le modèle à sous unités de Walstra et le modèle « nanoclusters ». Les différentes analyses par imagerie pour déterminer le modèle à privilégier n'ont pas permis encore d'éliminer l'un ou l'autre des modèles [76].

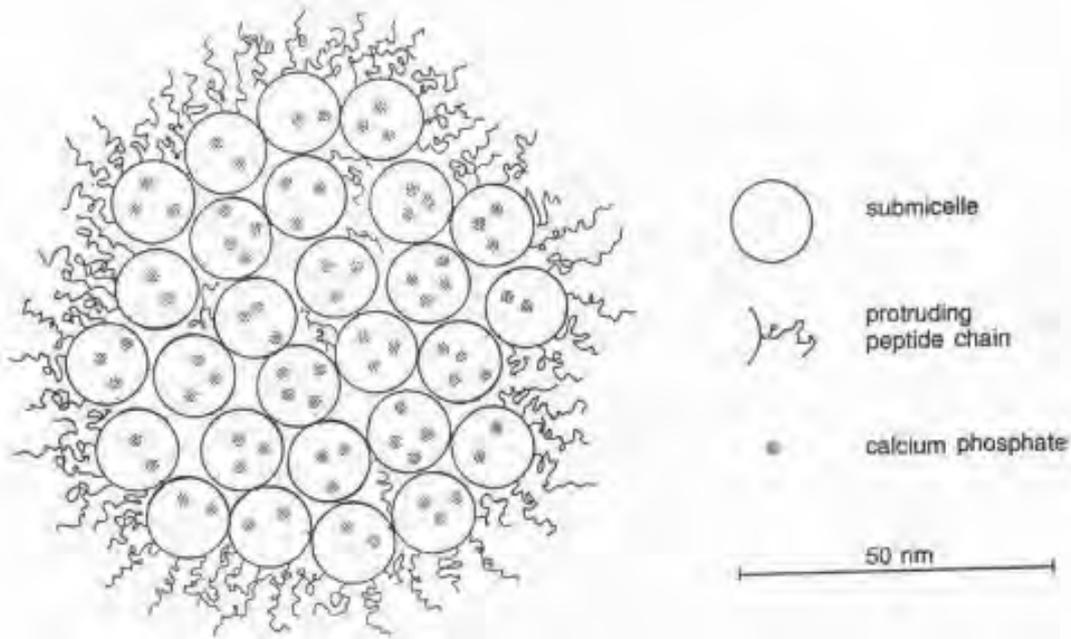


Figure 26 : Une micelle par Pieter Walstra. 1999. Modèles à sous-unités [32].
Calcium phosphate : ponts phosphocalciques.

Dans ce modèle à sous-unités, la micelle est assimilée à une sphère composée de sous-unités (submicelles), elles-mêmes sphériques dont la taille varie entre 10 et 20 nm. Les submicelles auraient un coeur hydrophobe et une couche externe constituée d'une partie hydrophile, les résidus chargés seraient donc exposés à la surface. Il existerait deux types de submicelle : celles constituées de caséines α et β et celles constituées de caséines α et κ . Les sous-unités riches en caséine κ se situeraient préférentiellement à la surface de la micelle. La partie terminale et hydrophile de la caséine κ forme une couche hydrophile à la surface de la micelle. Les interactions hydrophobes au sein des submicelles, et les liaisons par les phosphates de calcium entre les submicelles, assurent la cohésion de la micelle.

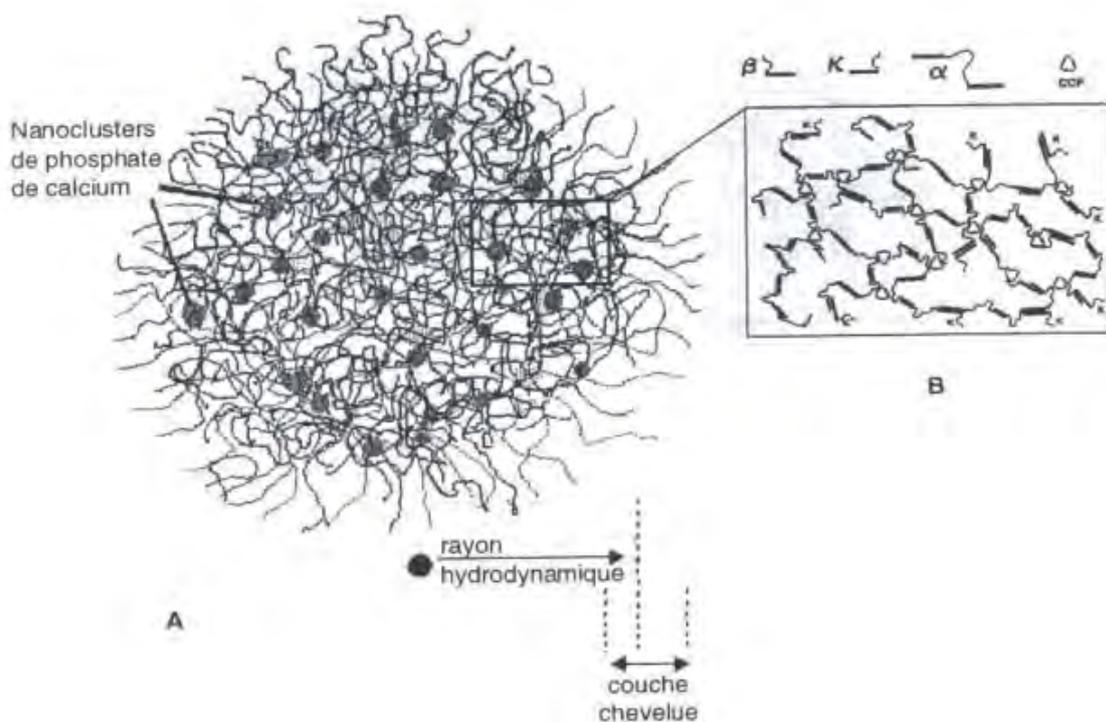


Figure 27 : Une micelle par le modèle « nanoclusters ». Horne et al. 1998.

Dans le modèle « nanoclusters », la micelle est un réseau construit à partir d'un point de nucléation qui s'est développé grâce aux interactions (faibles et fortes). Les groupes CCP (phosphate de calcium) quant à eux, sont à l'origine d'interactions fortes avec les régions hydrophiles des caséines α et β qui permettent la formation des nanoclusters (figure 28). Les nanoclusters sont des structures de 2,3 nm. Les interactions faibles (interactions hydrophobes principalement), sont favorisées par la création de ces nanoclusters. La micelle est un édifice poreux dans lequel s'est formé un réseau de caséine α ou la caséine β , vient s'insérer. La caséine κ quant à elle ne peut former de liaison avec les CCP. La caséine κ se lie au réseau par son segment hydrophobe et limite le développement du réseau micellaire, à l'extérieur de la micelle la caséine κ forme une couche chevelue qui participe à la stabilisation de l'édifice.

La figure 28 modélise les interactions faibles (hydrophobes) entre les caséines et les interactions fortes CCP/caséines, par les segments hydrophiles.

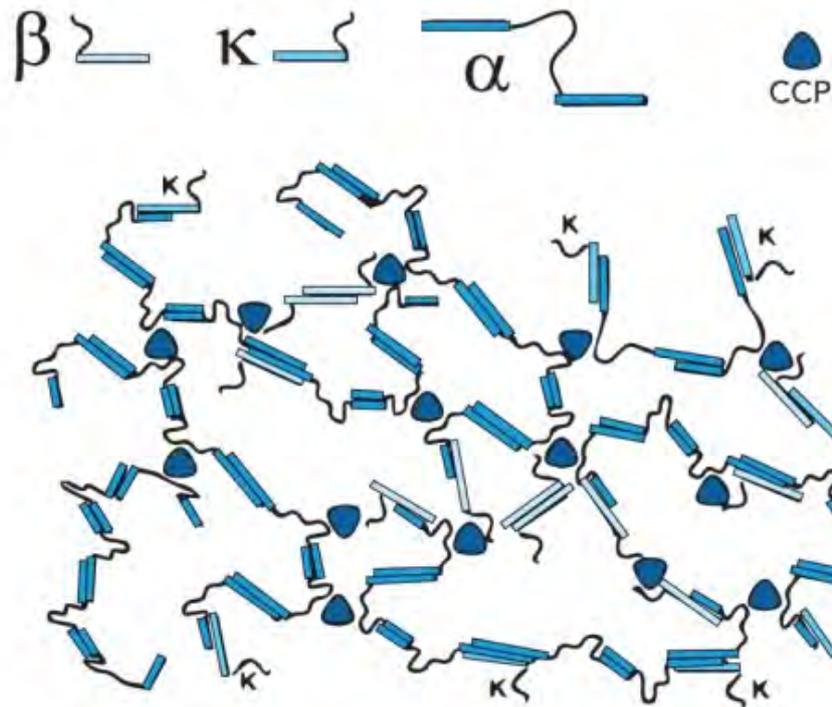


Figure 28 : Représentation de la structure à dualité des liens des caséines Horne et al. 1998.

A.3. Le lactosérum

Les principales protéines qui sont retrouvées dans le lactosérum sont les β -lactoglobuline, α -lactalbumine, immunoglobuline, albumine sérique, lactoferrine bovine, en quantité très faible également IGF-1 et 2, PDGF, TGF et somatotropine bovine (STB). Nous retrouvons également des vitamines (B1, B2, B6) [30].

➔ Il existe différentes techniques de récupération des protéines du lactosérum. Le but de ces techniques est la concentration du lactosérum pour pouvoir produire des poudres à haute teneur de protéines :

- La thermocoagulation :

C'est une méthode basée sur la précipitation des protéines de sérum par chauffage en milieu acide. Toutefois il faut signaler que si le rendement de récupération maximum se situe vers pH 5,0 - 5,5, la précipitation à des pH plus bas ou plus haut permet de produire des protéines plus solubles ou plus facilement dispersibles (Linden et Lorient., 1994) [33].

▪ La chromatographie à échange d'ions :

Elle est utilisée pour la production industrielle de concentré (90% et plus). Dans le cas du lactosérum doux (lactosérum dont le pH est de 6,5 obtenu par coagulation du lait avec de la présure), le procédé retenu consiste à mettre en œuvre une colonne de résine échangeuse d'anions (sphérosil QMA) et une colonne de résine échangeuse de cations faibles (sphérosil C). En effet, au pH du lactosérum doux (pH=6,5) la plupart des protéines sont sous forme anionique et s'absorbent sur échangeur d'anions et une faible proportion (7 à 10%), essentiellement constituée d'immunoglobulines, est sous forme cationique et s'absorbent sur échangeur de cations (Linden et Lorient, 1994) [33].

▪ La microfiltration :

Elle utilise des membranes qui permettent de séparer des micro particules du lait. En l'occurrence, elle permet de retenir des particules de 10^4 à 10^2 nm. La microfiltration permet de stériliser le lait et d'enlever les micro-organismes. Cette étape permet de prolonger la durée de vie du lactosérum. Elle peut être une première étape avant d'autres filtrations [34].

▪ L'ultrafiltration :

C'est un procédé qui utilise la séparation par membranes semi-perméables. L'ultrafiltration, sous pression relativement faible de 1 à 7 bars, permet de retenir les molécules d'un poids moléculaire de l'ordre de 5000 Da dissoute, ce qui correspond à des particules de 10^2 à 10^0 nm. Cette caractéristique est suffisante pour retenir l'ensemble des protéines contenues dans le lactosérum puisque la plus petite protéine du lactosérum est l' α -lactalbumine qui a un poids moléculaire de 14,2k Da. Le lactose, lui, ne sera pas retenu par la membrane et se retrouvera dans le perméat. Les protéines seront dans le rétenat, cette technique permet de concentrer la fraction protéique du lactosérum [35].

➔ Suivant la technique d'extraction utilisée, la qualité de la fraction protéique du lactosérum obtenu sera impactée. La thermocoagulation et la microfiltration obtiendront de moins bons résultats que la chromatographie par échange d'ions et l'ultrafiltration quant à la concentration en protéines de la fraction protéique du lactosérum. De plus, l'ultrafiltration permet de produire une préparation avec une teneur faible en lactose ce qui est un avantage en cas de troubles digestifs liés au lactose [36].

➔ Il existe plusieurs types de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait dans le commerce [37] :

- Les concentrés de lactosérum : (Whey Protein Concentrat)

Il s'agit de la poudre de lactosérum la plus répandue, elle est obtenue principalement par microfiltration du lactosérum de lait de vache. Elle est composée en général de 29 à 89 % de protéine de lactosérum, on y retrouve également du lactose et une fraction lipidique. Cette forme de préparation est de manière générale moins chère, car elle contient une proportion de protéine de lactosérum moins importante et beaucoup de lactose.

- L'isolat de lactosérum : (Whey Protein Isolate)

Cette poudre de lactosérum peut être obtenue de deux manières, soit par ultrafiltration, soit par chromatographie par échange d'ions. Le procédé utilisant la chromatographie par échange d'ions est économiquement plus rentable, mais il y a un risque d'endommager les acides aminés. L'isolat de lactosérum peut contenir plus de 90 % de protéines, et de très faibles quantités de lactose. La fraction lipidique est quasi nulle.

- Les poudres de caséine pure ou associées à du lactosérum :

La caséine en milieu acide, comme dans l'estomac, va se gélifier. Pour cette raison, la digestion et la diffusion des acides aminés dans le sang se fera de manière plus lente qu'avec une préparation à base de lactosérum. Ces poudres à base de caséines sont recommandées par les fabricants pour leur effet satiétant et pour la récupération musculaire [37].

A.4. Exemples de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait présentes sur le marché français

Les marques Françaises qui dominent le marché (en % du chiffre d'affaire en 2020) des protéines en poudre issues du lait sont STC Nutrition®, EA FIT®, Optimim Nutrition® :

- ➔ **Indications des protéines en poudre issues du lactosérum : protéines rapidement assimilées ayant pour but l'amélioration de la récupération et du développement musculaire.**

Tableau 8 : Les différentes protéines en poudre à base de protéines de lait du marché Français.

	Informations nutritionnelles :	Procédé de fabrication	Conseils d'utilisation
 <p>Premium Whey de STC Nutrition® . Denrées alimentaires. Préparation en poudre pour boisson riche en protéines.</p>	<p>Informations nutritionnelles moyennes par portion (25 g) :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Énergie : 94 - 95 kcal (399 - 404 kJ) •Matières grasses : 0,9 – 1,0 g •Dont acides gras saturés : 0,5 – 0,6 g •Glucides : 1,5 - 1,9 g •Dont sucres : 1,1 - 1,2 g •Fibres : 0,25 – 0,4 g •Dont Fibres d'acacia : 0,2 g •Protéines natives de lactosérum : 20 g •Dont Leucine : 2600 mg •Dont Isoleucine : 1200 mg •Dont Valine : 1100 mg •Total BCAA : 4900 mg •Sel* : 0,3 – 0,5 g •Dont Sodium* : 0,1 – 0,2 g •Vitamine B2 : 0,13 mg •Vitamine B3 : 1,5 mg •Vitamine B5 : 0,56 mg •Vitamine B6 : 0,13 mg •Vitamine B12 : 0,23 µg •Calcium : 75 mg <p>Aminogramme / 100 g protéines</p> <ul style="list-style-type: none"> •Isoleucine* : 5,8 - 5,9 g •Leucine* : 13,0 g •Lysine* : 10,6 g •Méthionine* + Cystine : 5,4 g •Phénylalanine* + Tyrosine : 7,8 g •Thréonine* : 5,5 g •Tryptophane* : 2,3 g •Valine* : 5,6 g •Alanine : 5,2 g •Arginine : 2,9 – 3,0 g •Acide aspartique : 12,1 g •Acide glutamique : 18,7 g •Glycine : 2,0 g •Histidine : 2,2 g •Proline : 5,1 g •Sérine : 4,8 g <p>Indice chimique : 111</p>	<p>Protéines natives de lait. Pur concentré de lactosérum issu de lait obtenu par ultra-filtration.</p>	<p>Mélanger 25 g du produit avec 150 mL d'eau ou de lait écrémé. A consommer 1 à 2 fois par jour et de préférence entre les repas ou maximum 1 heure après la séance d'entraînement. Le cas échéant, suivre les recommandations d'un professionnel du sport ou de la santé.</p> <p>Autres recommandations : Conserver hors de la portée des enfants, de la chaleur et de l'humidité. Il est recommandé de ne pas dépasser le dosage conseillé et de boire au moins 1,5 à 2 litres d'eau par jour. A consommer de préférence avant la date indiquée sur la</p>

			boîte.
 <p>Pure Whey EAFIT®. Denrées alimentaires. Préparation en poudre pour boisson riche en protéines.</p>	<p>Informations nutritionnelles moyennes par portion (40 g) :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Énergie : 151 kcal (639 kJ) •Matières grasses : 1,7 g •Dont acides gras saturés : 0,9 g •Glucides : 2,9 g •Dont sucres : 1,7 g •Fibres : 0,9 g •Protéines : 31 g •Sel : 0,5 g •Vitamine A : 225 ug •Vitamine E : 3,7 mg •Vitamine C : 15 mg •Vitamine B2 : 0,41 mg •Vitamine B3 : 4,5 mg •Vitamine B5 : 1,5 mg •Vitamine B6 : 0,5 mg •Vitamine B12 : 0,42 µg •Calcium : 126 mg •Phosphore : 47 mg •Magnésium 90 mg •Fer : 4 mg •Glutamine : 250 mg •Arginine : 250 mg •Taurine : 56,25 mg <p>BCAA pour 100 gr : 24,3 gr</p>	<p>Mélange de concentré de protéines de lactosérum (obtenu par micro-filtration), Isolat de protéines de latctosérum (obtenu par ultra-filtration).</p>	<p>Mélanger 40 g du produit avec 250 mL d'eau. Selon votre poids, prenez 1 à 2 préparation/jour, le matin au réveil ou juste après l'entraînement. Ne pas dépasser la dose recommandée. Il est conseillé de consommer ce complément dans le cadre d'une alimentation variée et équilibrée et d'un mode de vie sain. Bien refermer après ouverture. À conserver à l'abri de la chaleur et de l'humidité. Tenir hors de portée des enfants. À consommer de préférence avant la date indiquée sur le pot.</p>
		Mélange de concentré	

 <p>Whey Optimum Nutrition®.</p> <p>Denrées alimentaires. Préparation en poudre pour boisson riche en protéines.</p>	<p>Informations nutritionnelles moyennes par portion (27 g) :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Énergie : 104 kcal (434 kJ) •Matières grasses : 1,9 g •Dont acides gras saturés : 0,6 g •Glucides : 1,4 g •Dont sucres : 1,0 g •Fibres : 0 g •Protéines : 20 g •Sel : 0,1 g 	<p>de protéines de lactosérum (obtenu par micro-filtration), Isolat de protéines de lactosérum (obtenu par ultra-filtration).</p>	<p>Mélanger 27 g du produit avec 150 mL d'eau. À prendre 30 à 60 minutes après l'entraînement.</p>
---	--	---	--

➔ **Indications des protéines en poudres composées de caséines : protéines assimilées lentement ayant pour but le maintien de la masse musculaire lors de régime hypocalorique ou d'un programme d'entraînement intensif.**

Tableau 9 : Aliments ditététiques de l'effort à base de caséines .

	Informations nutritionnelles :	Procédé de fabrication :	Conseils d'utilisation :
	<p>Informations nutritionnelles moyennes par portion (25 g) :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Énergie : 89 - 90 kcal (376 - 382 kJ) •Matières grasses : 0,2 – 0,3 g •Dont acides gras saturés : 0,1 – 0,2 g •Glucides : 1,5 - 2,3 g •Dont sucres : 1,0 – 1,1 g •Fibres : 0,2 – 0,6 g •Dont Fibres d'acacia : 0,2 – 0,3 g •Protéines : 20 g •Dont Leucine : 1700 mg •Dont Isoleucine : 1000 mg •Dont Valine : 1200 mg •Dont Total BCAA : 3900 mg •Dont Caséinates : 7,3 – 8,0 g •Dont Caséines micellaires : 9,7 g •Sel* : 0,05 – 0,1 g •Dont Sodium* : 0,02 – 0,04 g •Vitamine B6 : 0,2 mg •Calcium : 452 – 450 - 459 mg 		<p>Mélanger 25 g de poudre (2 cuillères doseuses) dans 150 à 250 ml d'eau ou toute autre boisson à votre</p>

 <p>Micellar CASEIN de STC Nutrition® .</p> <p>Dénrées alimentaires.</p> <p>Préparation en poudre pour boisson riche en protéines.</p>	<p>•Aminogramme / 100 g protéines</p> <ul style="list-style-type: none"> •Isoleucine* : 4,7 – 4,8 g •Leucine* : 8,7 - 8,8 g •Lysine* : 7,4 g •Méthionine* + Cystine : 3,0 – 3,1 g •Phénylalanine* + Tyrosine : 9,3 - 9,4 g •Thréonine* : 3,9 g •Tryptophane* : 1,2 - 1,3 g •Valine* : 5,8 – 5,9 g •Alanine : 2,9 g •Arginine : 3,2 – 3,3 g •Acide aspartique : 6,6 – 6,7 g •Acide glutamique : 18,7 – 18,9 g •Glycine : 1,6 – 1,7 g •Histidine : 2,5 - 2,6 g •Proline : 9,0 - 9,1 g •Sérine : 5,1 g 	<p>Caséines micellaires de lait concentré obtenues par ultra-filtration.</p>	<p>convenance. A consommer 1 à 2 fois par jour, de préférence au moment des repas, ou après la séance d'entraînement ou en collation.</p>
 <p>Ripped MaxCaseine EAFIT®.</p> <p>Dénrées alimentaires.</p>	<p>Informations nutritionnelles moyennes par portion (30 g) :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Énergie : 103 kcal (436 kJ) •Matières grasses : 0,7 g •Dont acides gras saturés : 0,4 g •Glucides : 1,2 g •Dont sucres : 0,9 g •Fibres : 0,8 g •Protéines : 22 g •Dont Caséines : 18,68 g •Sel : 0,09 g •Vitamine A : 230 ug •Vitamine E : 3,7 mg •Vitamine C : 16 mg •Vitamine B2 : 0,35 mg •Vitamine B3 : 4,5 mg •Vitamine B5 : 1,5 mg •Vitamine B6 : 0,5 mg •Vitamine B12 : 0,42 µg •Calcium : 547 mg •Phosphore : 378 mg •Magnésium 75 mg •Fer : 3 mg •L-Carnitine : 750 mg •Caféine : 51 mg <p>•Aminogramme / 100 g protéines</p> <ul style="list-style-type: none"> •Isoleucine* : 5,6 g •Leucine* : 9,8 g •Lysine* : 8,7 g •Cystine : 0,9 g •Tyrosine : 4,6 g •Thréonine* : 4,0 g •Tryptophane* : 1,7 g •Valine* : 6,0 g •Alanine : 3 g •Arginine : 3,7 g 	<p>Isolat de protéines de lait (Microfiltration)</p>	<p>Mélanger 30 g dans 1/4 de litre d'eau, 1 à 2 fois par jour, le soir au coucher ou le matin au réveil, pour maximiser l'apport protidique. Ne pas dépasser la dose recommandée. Il est conseillé de consommer ce complément dans le cadre d'une alimentation variée et équilibrée et d'un mode de vie sain. Bien refermer après ouverture. À conserver</p>

<p>Préparation en poudre pour boisson riche en protéines.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Acide aspartique : 7,4 g •Acide glutamique : 19,1 g •Glycine : 1,7 g •Histidine : 2,3 g •Proline : 9,9 g •Sérine : 5,3 g •Méthionine : 2,6 g •Phénylalanine : 4,7 g 		<p>à l'abri de la chaleur et de l'humidité. Tenir hors de portée des enfants. À consommer de préférence avant la date indiquée sous le pot.</p>
<div style="text-align: center;">  </div> <p>Gold Standard 100 % Casein Optimum Nutrition®.</p> <p>Denrées alimentaires. Préparation en poudre pour boisson riche en protéines.</p>	<p>Informations nutritionnelles moyennes par portion (32 g) :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Énergie : 114 kcal (479 kJ) •Matières grasses : 0,5 g •Dont acides gras saturés : 0,2 g •Glucides : 3,2 g •Dont sucres : 1,7 g •Fibres : 0,4 g •Protéines : 24,4 g •Sel : 0,61 g •Calcium : 704 mg 	<p>Extraction par ultra-filtration.</p>	<p>Mélanger 32 g dans 200 à 400 mL d'eau.</p> <p>Prenez 2 doses par jour.</p> <p>Prenez une dose avant le petit-déjeuner et une avant d'aller dormir.</p>

Tableau 10 : Aliments diététiques de l'effort associant protéines de lactosérum, créatine, taurine.

	Informations nutritionnelles :	Procédé de fabrication :	Conseils d'utilisation :
	<p>Informations nutritionnelles moyennes par portion (30 g) :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Énergie : 105 - 107 kcal (447 - 455 kJ) •Matières grasses : 0,8 - 0,9 g •Dont acides gras saturés : 0,5 - 0,6 g •Glucides : 12 - 13 g •Dont sucres : 8,0 - 8,3 g •Fibres : 0,3 - 0,7 g •Dont Fibres d'acacia : 0,3 - 0,5 g 		

 <p>Iron Force STC Nutrition® . Denrées alimentaires. Préparation en poudre pour boisson riche en protéines.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Protéines natives : 12 g •Dont Leucine : 1400 mg •Dont Isoleucine : 700 mg •Dont Valine : 700 mg •Dont Total BCAA : 2800 mg •Dont Acide glutamique : 2300 mg •Sel* : 0,3 -0,4 g •Dont Sodium* : 0,12 – 0,16 g •Vitamine B2 : 0,2 mg •Vitamine B3 : 1,8 mg •Vitamine B5 : 0,7 mg •Vitamine B6 : 0,2 mg •Vitamine B12 : 0,3 µg •Calcium : 165 – 168 mg •Créatine : 1,5 g •Taurine : 50 mg <p>Aminogramme / 100 g protéines</p> <ul style="list-style-type: none"> •Isoleucine* : 5,7 – 5,8 g •Leucine* : 11,6 – 11,8 g •Lysine* : 9,5 – 9,7 g •Méthionine* + Cystine : 4,5 – 4,6 g •Phénylalanine* + Tyrosine : 8,1 g •Thréonine* : 5,1 g •Tryptophane* : 1,8 – 1,9 g •Valine* : 5,6 g •Alanine : 4,6 g •Arginine : 3,2 – 3,3 g •Acide aspartique : 10,5 – 10,6 g •Acide glutamique : 18,8 – 18,9 g •Glycine : 2,0 – 2,1 g •Histidine : 2,3 g •Proline : 6,3 g •Sérine : 4,8 – 4,9 g <p>Indice chimique : 112 - 113</p>	<p>Concentré de lactosérum issu de lait obtenu par ultrafiltration.</p>	<p>Mélanger 30 g de poudre dans 200 ml d'eau ou toute autre boisson à votre convenance. A consommer 1 à 2 fois par jour, de préférence 30 min à 1h avant l'entraînement et/ou juste après la séance.</p>
	<p>Informations nutritionnelles moyennes par portion (60 g) :</p> <ul style="list-style-type: none"> •Énergie : 216 kcal (913 kJ) •Matières grasses : 2,1 g •Dont acides gras saturés : 1,3 g •Glucides : 4,2 g •Dont sucres : 2,5 g •Fibres : 4,7 g •Protéines : 43 g •Sel* : 0,65 g •Vitamine A : 131 µg •Vitamine E : 2,2 mg •Vitamine C : 12 mg •Vitamine B1 : 0,21 mg •Vitamine B2 : 2,4 mg •Vitamine B3 : 2,6 mg •Vitamine B5 : 0,94 mg •Vitamine B6 : 0,3 mg •Vitamine B12 : 0,42 µg •Calcium : 165 – 168 mg •Créatine : 1,5 g •Taurine : 50 mg <p>Aminogramme / 100 g protéines</p> <ul style="list-style-type: none"> •Isoleucine* : 6,5 g •Leucine* : 12,1 g •Lysine* : 10,5 g 	<p>Mélange de concentré de protéines de lactosérum (obtenu par micro-filtration), Isolat de protéines de</p>	<p>Selon votre poids, prenez 1 à 2 shaker par jour le matin au réveil et juste après l'entraînement. Ne pas dépasser la dose recommandée. Il est conseillé de consommer ce complément dans le cadre d'une alimentation variée et équilibrée et d'un mode de vie sain.</p>

<p>Mega Whey EAFIT®.</p> <p>Denrées alimentaires.</p> <p>Préparation en poudre pour boisson riche en protéines.</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Cystine : 2,8 g •Tyrosine : 3,6 g •Thréonine* : 6,4 g •Tryptophane* : 2,0 g •Valine* : 5,9 g •Alanine : 5,3 g •Arginine : 2,7 g •Acide aspartique : 11,5 g •Acide glutamique : 18,7 g •Glycine : 1,9 g •Histidine : 2,0 g •Proline : 5,8 g •Sérine : 4,9 g •Méthionine : 2,4 g •Phénylalanine : 3,6 g 	<p>lactosérum (obtenu par ultra-filtration).</p>	<p>Bien refermer après ouverture. À conserver à l'abri de la chaleur et de l'humidité. Tenir hors de portée des enfants. À consommer de préférence avant la date indiquée sous le pot.</p>
---	--	--	--

B. Populations concernées

B.1. Habitude de consommation des sportifs

D'après une enquête pour l'American Psychological Association en 2015 du Dr Archiro R., nous constatons aux Etats-Unis que près du tiers des pratiquants de musculation se préoccupent de leur utilisation de produits destinés aux sportifs (protéines de lactosérum, omega-3, glutamine...). Dans cette étude, 195 hommes consommateurs âgés de 18 à 65 ans ont été interrogés, 40 % de ces utilisateurs avouent une utilisation croissante de produits destinés aux sportifs [38].

Les disciplines d'athlétisme ont été bien étudiées et la prévalence de consommation d'aliments diététiques de l'effort a été évaluée à 45 % dans les disciplines de force au cours des jeux olympiques d'Athènes en 2004 (Tsitsimpikou et al. 2009) [39].

B.2. Etude quantitative de consommation des préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait (whey)

Dans une autre étude, ici en Italie (Palerme en 2013), qui interroge des pratiquants de centre de musculation (inscrits dans le registre national CONI : National Olympic Committee Register for Sport and Fitness Associations) quant à leur consommation en whey [40]. Un total de 561 participants de ces centres de gym ont été sélectionnés suivant les critères suivants :

- Les participants doivent avoir un entraînement exclusivement de type prise de force ou renforcement musculaire.
- Les participants ne doivent pas être obèses, indice de masse corporelle > 30 exclus (sauf si la masse musculaire est supérieure à la masse grasse.).

Tableau 11 : Caractéristiques des participants (âge, sexe, Body Mass Index = Indice de Masse Corporelle) [40] :

	<i>Subjects</i>	
	<i>Number</i>	<i>Percentage</i>
Age (yr)		
< 18	62	11%
18-30	314	56%
> 30	185	33%
Mean (SD)	28,2 ± 10 yrs	
Gender		
Female	127	22.6%
Male	434	77.4%
Body mass index		
< 25 kg/m ²	385	68.63%
25 ≤ 30 kg/m ²	150	26.74%
≥ 30 kg/m ²	26	4.63%

Les participants ont été interrogés sur leurs habitudes de consommation de protéines de lactosérum et les résultats du questionnaire sont les suivants :

Tableau 12 : Fréquence de consommation et type de produits destinés aux sportifs utilisés par les participants [40] :

	Subjects	
	Number	Percentage
Supplements use		
No	397	70.8%
Yes	164	29.2%
Supplement users (164)		
Male	138	84.1%
Female	26	15.9%
Frequency of use (164)		
1 time per wk	9	5.5%
2 time per wk	9	5.5%
3 time per wk	46	28%
4 time per wk	18	11%
5 time per wk	59	36%
6 time per wk	2	1.2%
7 time per wk	21	12.8%
Other supplements (107)^{a, b}		
Vitamins	8	7.5%
Creatine	15	14%
Amino acids	42	39.2%
Creatine + Amino acids	31	29%
Vitamins + Amino acids	2	1.9%
Creatine + Vitamins + Amino acids	9	8.4%

^aOther supplements in association with protein supplements.

Nous pouvons constater que près de 30 % des participants de cette étude consomment des protéines de lactosérum (majoritairement des hommes 84,1%), 50 % des consommateurs prennent leur protéines de lactosérum au moins 5 fois par semaine. Et, 107 participants sur 164 (soit 65,2 %) ajoutent des acides aminés, des vitamines et de la créatine à la consommation de leur protéines de lactosérum.

Cette étude nous montre une forte tendance des jeunes (18-30 ans) à consommer des produits protéinés seuls ou en association avec d'autres produits (créatine, vitamines, acides

aminés).

Le domaine d'étude de la population française pratiquant les sports de résistance et consommant des suppléments protéinés est très peu documenté. Toutefois, on peut supposer, du fait des similarités avec cette étude ([40]) tant au niveau du marché économique que sur les habitudes alimentaires dans la population française, que cette tendance à une augmentation de la consommation des produits à base de protéines de lactosérum, est également présente en France.

B.3. Etude du marché économique de la nutrition sportive

D'après une étude réalisée par le cabinet d'étude EUROMONITOR, le marché Français des produits de nutrition pour le sport a généré un chiffre d'affaire de 109,7 millions d'euros en 2016 et a enregistré une croissance annuelle de 5 % entre 2011 et 2016. Tout d'abord adressée à un marché de niche (bodybuilder et sportif de très haut niveau), la nutrition sportive est en train de se démocratiser. Les innovations dans ce domaine sont nombreuses et de plus en plus abordables pour les sportifs débutants, également le culte de la performance est de plus en plus présent dans notre société occidentale moderne. En effet, les grands groupes alimentaires sont de plus en plus nombreux à s'intéresser au domaine de la nutrition sportive comme par exemple le groupe Lactel et sa marque récente Apurna® .

On constate l'apparition de multiple marques sur le marché et les points de distribution se multiplient (pharmacie, parapharmacie, GMS, magasin spécialisé, internet). Citons quelques une des marques pionnières dans le marché :

- EA FIT® (leader sur le marché en % du chiffre d'affaire).
- STC Nutrition® .
- ISOSTAR® .
- OVERSTIM® .
- OPTIMUM NUTRITION® .

L'exceptionnel accroissement des ventes des préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait ne prouve pas réellement leur utilité, mais justifie de prendre en compte leur place au niveau de l'alimentation globale des individus.

C. Indications et intérêts de la consommation des préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait (whey)

Le premier effet et le plus connu pour lequel la whey est utilisée, c'est l'augmentation de la prise de masse musculaire lors de la pratique d'un entraînement de résistance musculaire.

La méta-analyse de Robert W. Morton et al. 03-2018, sera un support quant à l'avance de cet effet [41].

Le but de cette étude est de répondre à plusieurs questions :

- Est-ce que la supplémentation en protéine de lactosérum augmente la prise de muscle durant un entraînement de résistance musculaire ?
- Et si tel est le cas, quel est la dose qui montrera le meilleur résultat sur la prise de masse musculaire ?

● Méthode :

L'étude rassemble les données trouvées sur les moteurs de recherche Medline, Embase, CINAHL. Les critères d'éligibilité regroupent uniquement les études menées en essai contrôlé, randomisé chez des sujets pratiquant un entraînement de résistance musculaire d'une durée de 6 semaines ou plus et s'entraînant au moins deux fois par semaine, qui suivent une supplémentation en protéine de lactosérum, qui n'ont pas de régime de restriction calorique et qui sont en bonne santé. Enfin, l'étude vérifie que les sujets n'associent pas d'autres suppléments qui peuvent avoir potentiellement un effet sur l'hypertrophie musculaire (créatine par exemple). Pour analyser correctement les données recueillies, nous nous attacherons à utiliser 4 variables permettant de mettre en évidence une différence dans l'efficacité de la prise de supplément protéique du groupe des sujets retenus.

Les 4 variables sont l'âge du sujet, le niveau d'entraînement, la dose de protéine absorbée et enfin l'apport protéique de base du sujet (alimentation courante).

● Résultat :

Au total, ce seront 49 études qui seront analysées provenant de 17 pays différents. Sur ces 49 études, 10 études sont axées sur des sujets entraînés. Les études ont été réalisées de 1962 à 2016 et le nombre total des sujets est 1863 participants pour un âge moyen de 35 ans.

Les programmes d'entraînement s'étendent sur une durée de 6 à 52 semaines avec des

fréquences d'entraînement de 2 à 5 séances par semaine. L'organisation moyenne des séances de musculation est la suivante : 1 à 14 exercices (moyenne à 7 exercices) différents par entraînement, 1 à 12 séries (moyenne à 4 séries) par exercice et 3 à 25 répétitions par série (moyenne à 9 répétitions).

L'apport protéique combiné du supplément protéique et de l'apport protéique de l'alimentation de base est d'une moyenne de 1,8 g/kg/j dans le groupe prenant une supplémentation et de 1,3 g/kg/j dans le groupe ne prenant pas de supplément protéique. La différence de l'apport énergétique entre les deux groupes n'est pas significativement importante (voir **Annexe 1 pour le détails des conditions expérimentales et de contrôles au sein des différentes études de cette méta-analyse**).

Enfin ils ont utilisé deux marqueurs d'efficacité de l'action de la supplémentation en protéines, à savoir la répétition maximale sur 1 répétition d'un exercice musculaire (1RM) et la prise de masse musculaire sèche chez le sujet (FFM).

- 1RM : (One Repetition Max) est la charge maximale qu'un sujet donné peut développer sur un exercice de musculation (exemple : squat, développé couché.).
- FFM : (Fat Free Mass) correspond à la masse musculaire sèche. La mesurer, permet de contrôler la prise de masse musculaire du sujet et donc de l'efficacité de l'entraînement. La FFM dans les diverses études de cette méta-analyse a été mesurée par absorptiométrie biphotonique à rayons X, hydrodensitométrie et par pléthysmographie par déplacement d'air (Bod-Pod).

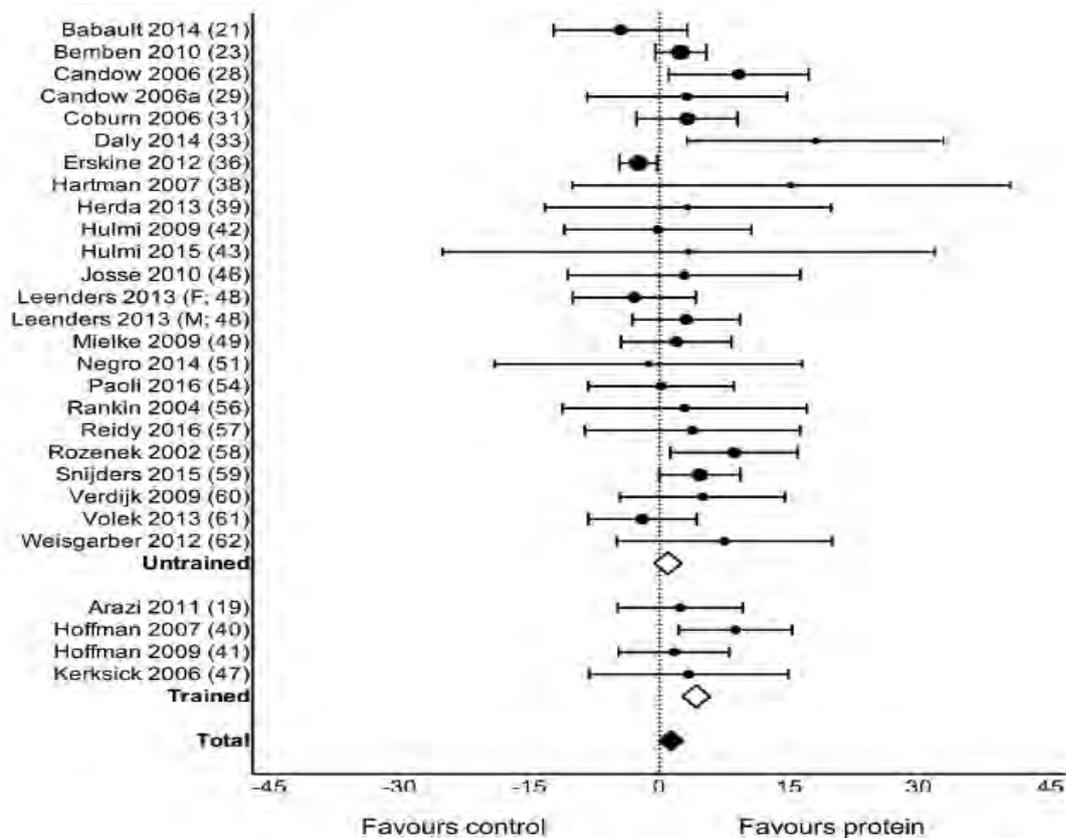


Figure 29 : Graphique en forêt de la méta-analyse de Robert W. Morton et al. des résultats d'essais randomisés sur la 1RM chez les sujets entraînés ou non.

Légende :

- En abscisse : la 1RM en kg.
- Favours control : résultats en faveur du groupe contrôle (effet négatif sur la 1RM).
- Favours protein : résultats en faveur du groupe protéines (effet positif sur la 1RM).

L'étude de Robert W Morton et al. rapporte une analyse de la 1RM chez les sujets non entraînés et entraînés, donc sur la capacité des suppléments protéinés à faire gagner de la force (**figure 29**). On constate chez les sujets non entraînés, une augmentation moyenne de 0,99 kg de la 1RM et chez les sujets entraînés 4,27 kg de la 1RM, la moyenne des deux groupes se situant à 2,49 kg. Cette moyenne correspond à la différence de gain entre le groupe contrôle et le groupe prenant le supplément protéiné. Pour chaque étude, la taille du cercle correspond au poids de l'étude (nombre de sujets) dans la méta-analyse et sa position correspond à la moyenne de chaque étude sur la 1RM. Enfin, les losanges correspondent à la moyenne de la 1RM de chaque groupes, en haut les groupes non entraînés, en bas les groupes

entraînés.

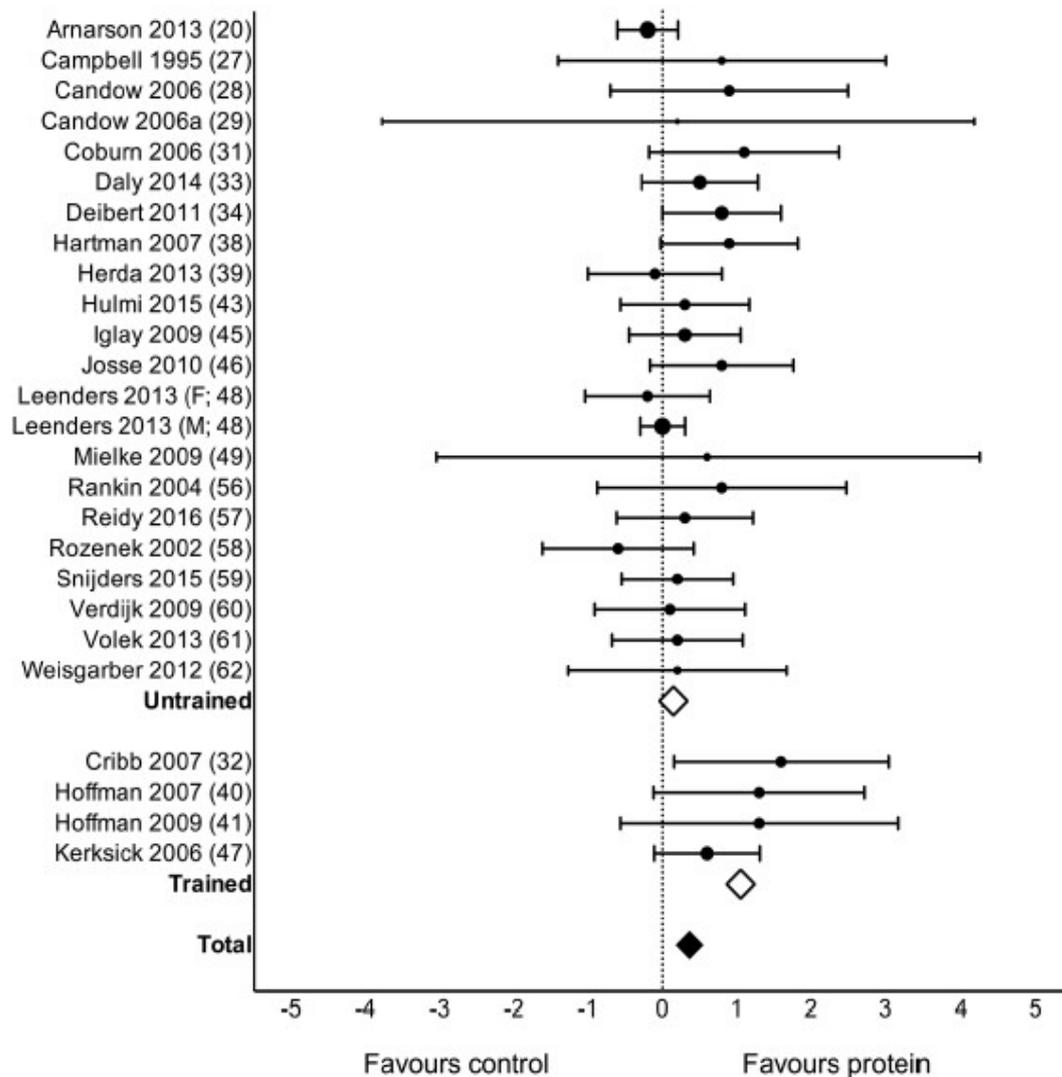


Figure 30 : Graphique en forêt de la méta-analyse de Robert W. Morton et al. des résultats d'essais randomisés sur la FFM chez les sujets entraînés ou non.

Légende :

- En abscisse la FFM perdu ou gagnée en kilogramme.
- Favours control : résultats en faveur du groupe contrôle (effet négatif sur la FFM).
- Favours protein : résultats en faveur du groupe protéines (effet positif sur la FFM).

L'étude de Robert W. Morton et al. rapporte une analyse des études qui ciblent la prise de masse musculaire des sujets (FFM) dans deux groupes, les sujets non entraînés et entraînés (figure 30). Les résultats sont pour les sujets non-entraînés, une augmentation moyenne de la FFM de 0,15 kg, pour les sujets entraînés 1,05 kg. Cette moyenne correspond à la différence

de gain entre le groupe contrôle et le groupe prenant le supplément protéiné. La moyenne des deux groupes est une augmentation moyenne de la FFM de 0,30 kg. La position du cercle sur l'échelle, correspond à la moyenne de l'augmentation ou la baisse de la FFM pour chacune des études, la taille du cercle est le poids de l'étude dans la méta-analyse (nombre de sujets participants). Enfin les losanges correspondent à la moyenne de l'augmentation de la FFM des deux groupes. L'échelle de l'abscisse est la FFM perdue ou gagnée en kilogramme.

L'étude met aussi en avant la relation entre la prise de masse musculaire (FFM) et l'âge (figure 31).

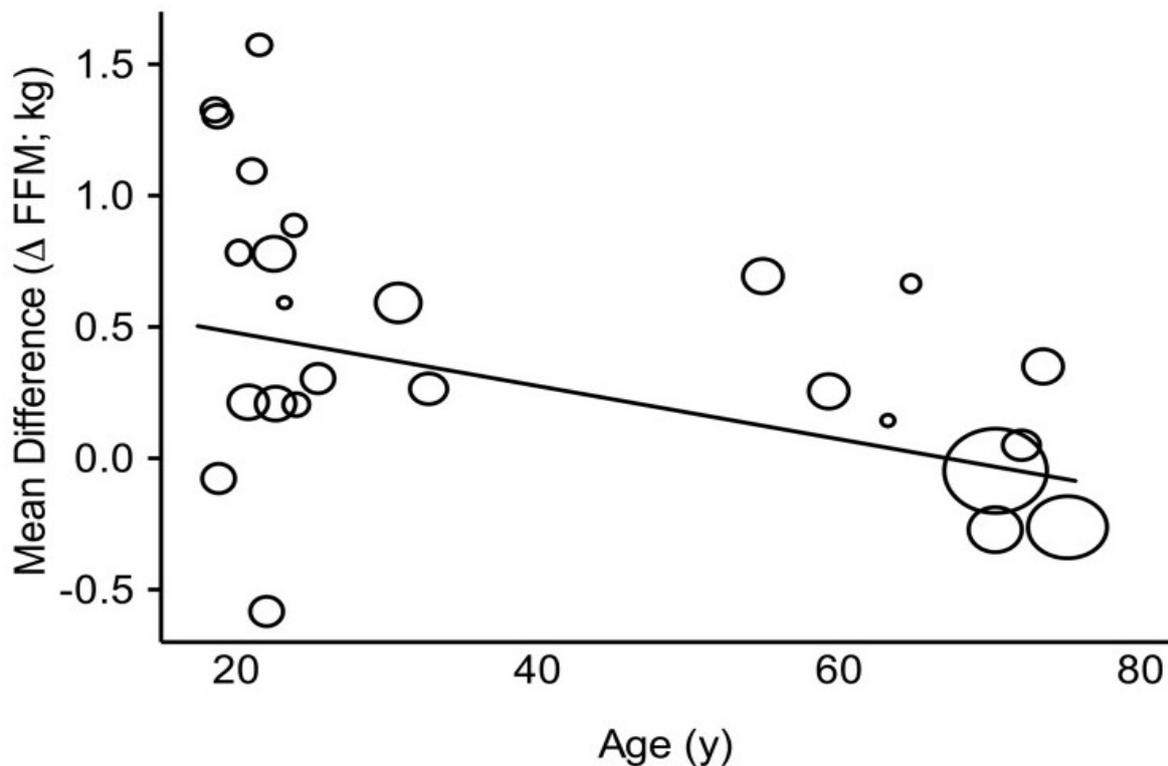


Figure 31 : Méta-régression comparant des études en fonction de l'âge des participants et de l'influence de l'âge sur la FFM. Chaque cercle correspond à une étude, et la taille du cercle au poids de l'étude sur la méta-analyse. La droite montre une tendance de diminution de la FFM avec l'âge, cette figure rassemble 25 études et 1033 participants. On visualise clairement une baisse progressive de l'augmentation de la FFM lors des études, en fonction de l'augmentation de l'âge [41].

Dans l'étude, on se pose également la question de la quantité de protéine maximale limitante sur la prise de masse musculaire (figure 32). En utilisant comme variable la quantité

totale en g/kg/j de protéine ingérée, la méta-analyse rassemble les données suivantes :

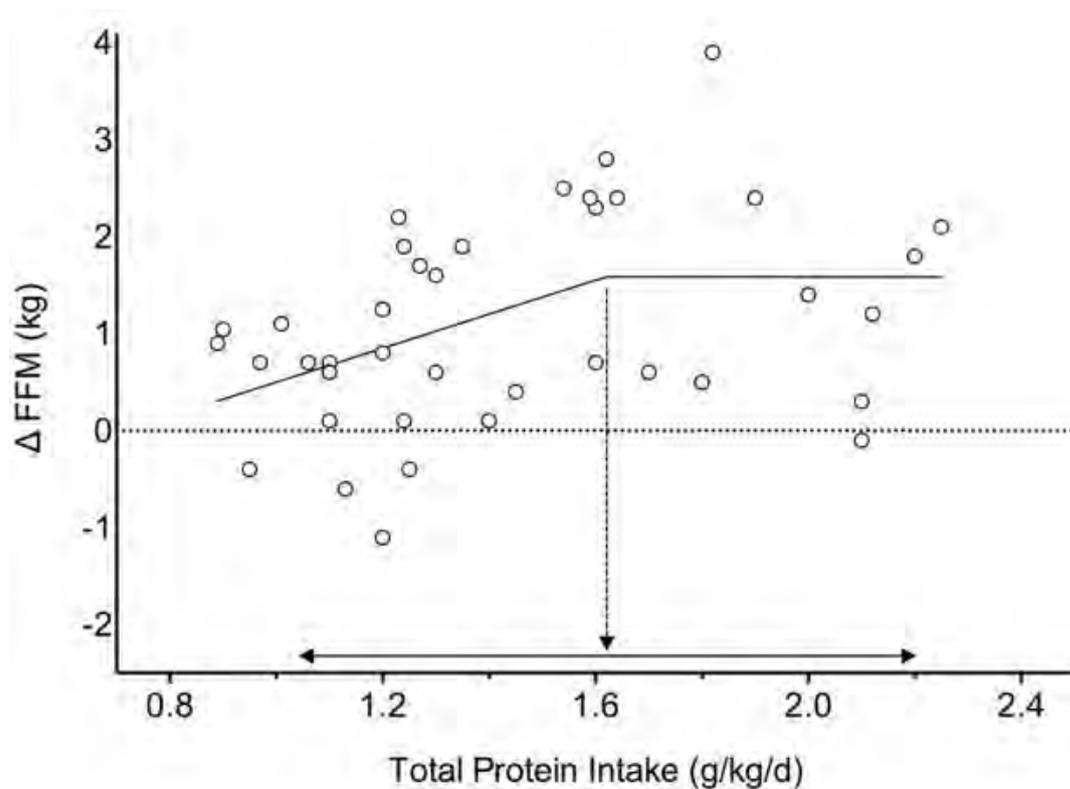


Figure 32 : Droite de régression linéaire qui met en lien la FFM en kg en fonction de l'apport total en protéines en g/kg/j. Chaque cercle correspond à une étude, en abscisse la quantité de protéine en g/kg/j consommée et en ordonné le gain de la FFM en kg. La droite correspond à la valeur moyenne de la progression de l'augmentation de la FFM en fonction des apports en protéines par jour. La valeur optimale des apports en protéines selon cette méta-analyse est de 1,62 g/kg/j, en effet, on distingue un palier au delà duquel un apport supérieur en protéine n'entraîne pas d'augmentation proportionnelle de la FFM [41].

- Conclusion et analyse :

La méta-analyse nous permet de dégager plusieurs conclusions sur la supplémentation en protéines lors d'un entraînement de résistance musculaire. Premièrement, la supplémentation en protéine de lactosérum augmente la force (2,49 kg d'augmentation sur la 1RM) et la prise de masse maigre (0,30 kg d'augmentation de la FFM), mais elle doit être nuancée. D'après les résultats obtenus, le gain en force et en masse musculaire est substantiellement supérieur chez le sujet entraîné par rapport au sujet non-entraîné (430% de gain en plus pour la 1RM et 700% de gain en plus pour la

FFM). Deuxièmement, l'efficacité sur le sujet jeune est également plus important que chez le sujet âgé. Enfin, on s'aperçoit qu'il y a un effet de seuil quant à l'efficacité dose-dépendante de la supplémentation en protéine, au-delà de 1,62 g/kg/j de protéine totale apportée, le gain en masse musculaire n'est pas proportionnel. On note un effet de seuil [41].

Compte tenu de cette méta-analyse, on s'aperçoit que la variable la plus importante influant sur l'augmentation des gains en force et en masse musculaire est l'entraînement du sujet à des exercices de résistance musculaire, plus celui-ci est entraîné, plus le gain est substantiel.

Pour un sujet dont l'apport nutritionnel serait de 1,62 g/kg/j de protéine la supplémentation en protéines n'est pas utile. L'utilité pour un sujet débutant à prendre une supplémentation en protéine peut donc être remise en question.

D. Effets indésirables

D.1. Effets indésirables attendus des préparations à base de lactosérum

D.1.1 Acné

L'acné est une pathologie chronique des follicules pilo-sébacés. On observe une hyper sécrétion de sébum, une anomalie de kératinisation et une modification de la composition du sébum qui entraînent l'obstruction du canal excréteur conduisant à la formation de comédons qui peuvent ensuite se compliquer en inflammations et infections (papules dans un premier temps puis pustules).

Pour étayer cette hypothèse nous allons nous appuyer sur une étude réalisée sur des jeunes adultes utilisateurs de protéines de lactosérum, qui analyse l'incidence de l'acné chez ces mêmes adultes. 30 individus sont étudiés d'âge moyen de 23 ans dont 37 % de femmes pour 63 % d'hommes. 14 de ces individus possèdent des antécédents d'acné et seulement 4 de ces individus sont traités pour cette pathologie [42].

Tableau 13 : Représentation du nombre de lésions retrouvées chez les individus étudiés sur une durée totale de 2 mois [42] :

Lesion	Month 0 MD ¹ (SD2)	Month 1 MD (SD)	Month 2 MD (SD)
Comedos	11.7 (21.9)	16.6 (21.5)	19.7 (21.9)
Papules	1.87 (3.8)	10.2 (8.0)	15.8 (11.1)
Pustules	0.3 (0.8)	9.5 (11.0)	14.0 (14.9)
Scars	3.1 (5.5)	4.1 (5.8)	4.9 (6.9)
Total lesions	17.1 (25.6)	40.4 (28.0)	54.4 (34.8)

Légende : comedos = comédons, scars = cicatrices, month = mois.

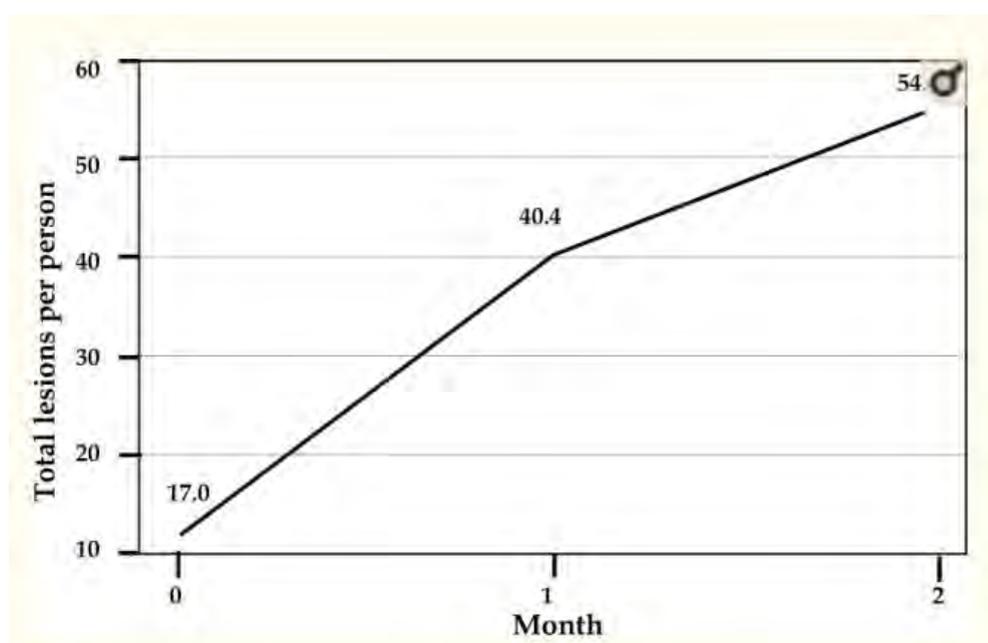


Figure 33 : Droite de régression linéaire montrant le total du nombre de lésions apparaissant en fonction de la durée (G. Costa Fernandes Filho. 2013) [42].

Cette étude met en évidence un risque d'aggravation et d'augmentation de l'acné puisque après seulement 2 mois d'ingestion quotidienne de protéines de lactosérum, nous multiplions par plus de 3 la survenue d'événements. Le pharmacien pourra mettre en garde le sportif lors de la délivrance de produits contenant du lactosérum en particulier si ce dernier présente des antécédents d'acné [42].

D.1.2. Modification du microbiote et troubles intestinaux

La flore bactérienne intestinale est importante au fonctionnement du tube digestif et dans son ensemble à l'organisme. La flore bactérienne possède une fonction dans la récupération des protéines au niveau de l'intestin au cours de la digestion, mais aussi un rôle dans le stockage des protéines. Au cours de la digestion, la flore intestinale va produire divers sous-produits comme les acides gras ramifiés à chaîne courte, l'ammoniac et métabolites soufrés, ainsi que des composés neuroactifs tels que la tryptamine et la sérotonine.

Nous savons déjà que certains de ces métabolites ont des propriétés délétères sur la santé. Par exemple, l'ammoniac et le sulfure d'hydrogène favorisent le cancer du côlon et les troubles inflammatoires de l'intestin. Une étude a démontré l'effet de la supplémentation en whey sur les modifications de la qualité du microbiote intestinal, les modifications du pH fécal, la production d'ammoniac et des divers métabolites liés à la digestion des protéines. Dix huit volontaires recrutés selon des critères spécifiques (âge compris entre 18 et 45 ans, pratiquant un sport de force ou d'endurance 240 min par semaine depuis 5 ans au moins et excluant les individus présentant des maladies ou des problèmes musculaires ou articulaires) [43]. Une partie du groupe se verra administrer une dose contrôle de maltodextrine et le second groupe recevra une dose composée à moitié de protéines de bœuf et de protéines de lactosérum. Les suppléments sont donnés tous les jours pendant 10 semaines. Après 10 semaines, nous n'observons aucune modification des paramètres suivants par rapport au contrôle notamment : de la composition en eau de la matière fécale ni du pH, de l'ammoniac, des acides gras à chaîne courte. Par contre, cette étude met en évidence une modification de la flore intestinale entre les deux groupes.

Nous relevons la présence de 4 phylas chez tous les participants à savoir : *Firmicutes*, *Bacteroidetes*, *Actinobacteria*, et *Proteobacteria*. Cette étude n'a mis en évidence aucun changement dans la diversité des microbiotes après l'intervention.

L'analyse de LEfSe (Linear discriminant analysis effect size) qui est une analyse discriminante linéaire, permet d'expliquer l'appartenance d'une bactérie à un groupe prédéfini à partir de ses caractéristiques. Cette analyse révèle une augmentation de l'abondance relative du phylum de *Bacteroidetes* dans le groupe prenant le supplément protéiné, ce qui concorde avec le fait que les espèces appartenant à ce phylum ont une activité protéolytique et certains *Bacteroides spp.* peuvent utiliser l'urée du catabolisme protéique comme source d'azote. Il est

ainsi possible que l'apport élevé de protéines par le supplément augmenterait la disponibilité de substrat pour ces bactéries, soutenant leur croissance sur d'autres bactéries du phylum *Firmicutes*. Un changement dans le ratio *Bacteroidetes/Firmicutes* avec une proportion réduite de *Firmicutes* a été mis en évidence lors d'une alimentation trop riche, lorsqu'il y a un surpoids et des troubles chroniques. Une diminution est observée des populations bactériennes suivantes dans le groupe prenant le supplément protéiné ; *Blautia*, *Roseburia* et *Bifidobacterium longum*. Une diminution des genres *Blautia*, *Bifidobacterium longum* ou *Roseburia* a déjà été associée aux régimes riches en protéines. Les genres *Roseburia* et *Blautia* sont impliqués dans la production d'acides gras à chaîne courte dont les bénéfices pour la santé ont été largement démontrés, et certaines souches de *Bifidobacterium longum* sont utilisées comme probiotiques pour leurs bénéfices supposés pour la santé.

En conclusion, une légère augmentation de l'apport en protéines résultant de la supplémentation en protéines chez les athlètes diminue le nombre de bactéries bénéfiques pour la santé présente dans le microbiote, sans affecter l'ammoniac ou le pH fécal. Les effets de la supplémentation en protéines pour le microbiote chez les athlètes doit être pris en compte, car les recommandations nutritionnelles concernant la consommation de protéines dans cette population sont plus élevées que pour la population en général. Les conséquences à long terme de la diminution de ces taxons bactériens (*Blautia*, *Roseburia* et *Bifidobacterium longum*) sur la santé intestinale sont inconnues [43].

D.1.3. Impact de la consommation sur la fonction rénale

L'apport en protéines alimentaires peut avoir des effets sur la fonction rénale et son rôle, dans l'insuffisance rénale, a suscité de nombreux débats dans la littérature. La consommation récurrente de protéines alimentaires en excès, favoriserait la néphropathie chronique par augmentation de la pression glomérulaire et de l'hyperfiltration [44].

Les diverses études mettent en avant que l'hyperfiltration en réponse à divers stimulus physiologiques est un mécanisme d'adaptation normal, mais peut-on généraliser ce propos à l'ensemble des individus sains [45]?

L'insuffisance rénale chronique est une atteinte rénale ou une dégradation de la fonction rénale qui correspond à une diminution du débit de filtration glomérulaire (DFG) pendant trois mois ou plus. Dans la population générale on considère que la dégradation de la

fonction rénale est un facteur de risque indépendant des maladies cardiovasculaires et de la mortalité, toutes causes confondues. Cependant on ignore dans quelle mesure une diminution de la fonction influence ce risque.

La référence la plus célèbre en matière de nocivité de l'excès de l'apport en protéines alimentaires sur la fonction rénale, est peut-être celle de Brenner [44]. Elle stipule que les situations associées à l'augmentation de la filtration et de la pression glomérulaire lors d'un apport protéique excessif, peuvent entraîner des lésions rénales et finalement altérer la fonction rénale. Cependant la majorité des preuves scientifiques sur le domaine sont basées sur des modèles animaux et de patients atteints d'une maladie rénale co-existante. La relation entre atteinte rénale et l'excès de consommation de protéines n'est donc pas clairement documentée.

Pour ce qui est de la formation des calculs rénaux, le rôle des régimes riches en protéines dans la formation des calculs a reçu également une grande attention. L'ingestion excessive de protéines augmente l'excrétion de substances potentiellement lithogéniques telles que le calcium et l'acide urique. Cependant, comme le montre l'étude : "Dietary protein intake and renal function. W. F. Martin. 2005", il y a peu de publications scientifiques documentées qui montrent un réel lien entre régime hyperprotéiné et augmentation du risque de formation de calcul rénal chez le sujet sain [46][47], à contrario les études qui relatent de ce même lien chez les sujets présentant un risque important d'en développer, existent [48][49] [50].

Pour conclure, bien que l'ingestion excessive de protéines demeure un problème de santé chez les personnes atteintes d'une maladie rénale préexistante, la littérature ne montre pas de recherches significatives démontrant le lien entre l'apport excessif en protéines et le développement ou la progression d'une maladie rénale. Les principaux changements de la fonction rénale lors d'un régime hyperprotéiné sont probablement un mécanisme adaptatif du rein sain. Il serait nécessaire de faire des études à long terme pour clarifier le peu de preuves actuellement disponibles.

D.1.4. Contaminations aux métaux lourds

Le célèbre site internet américain spécialisé dans le domaine de la santé www.webmd.com a fait analyser en 2010 un panel de protéines en poudre de diverses marques vendues sur le marché américain [51]. En l'occurrence, 15 boissons ont été analysées avec des

doses correspondant à trois portions journalières. Parmi ces 15 produits, 3 produits ont entraînés des expositions pour les utilisateurs à de l'arsenic, du cadmium et du plomb à des doses, soit supérieures, soit très proches des limites imposées par les normes américaines [51].

Cette mise en évidence ne doit pas être généralisée à l'ensemble de la production des préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait, mais elle pointe du doigt la possibilité de retrouver des métaux lourds, qui sont naturellement présents dans l'environnement et peut, malgré le respect des normes réglementaires en vigueur dans le pays de distribution, sur de longue période, exposer le consommateur à des doses élevées en métaux lourds.

En France, le laboratoire de sécurité des aliments de Maisons-Alfort (unité contaminants inorganiques et minéraux de l'environnement) a un mandat de référence (Laboratoire National de Référence.) pour les métaux lourds dans les denrées alimentaires d'origine animale. Les missions du LNR sont directement liées aux règlements européens.

- Le Règlement CE n°1881/2006 de la commission du 19/12/2006 porte sur la fixation de teneurs maximales pour certains contaminants.

Métaux lourds recherchés dans : lait cru, lait traité thermiquement et destiné à la fabrication de produits laitiers	Teneurs maximales
Plomb	0,02 mg/kg de poids à l'état frais.
Cadmium	Pas de teneur maximale à l'heure actuelle mais dans la saisine de l'ANSES n°2011-SA-0194 recommandation proposée : 0,005 mg/kg de poids à l'état frais.
Arsenic	Pas de teneur maximale ni de recommandation établi

D.2. Effets indésirables attendus des préparations contenant du lactosérum et de la caséine

D.2.1. Allergie et intolérance au lait de vache

Il existe deux types de troubles liés aux protéines de lait de vache. L'allergie au lait de vache et l'intolérance au lactose [52].

A l'âge adulte, l'allergie au lait de vache est relativement peu fréquente. Le tableau aiguë se manifeste par des vomissements possibles, une émission de selles liquides et peut se compléter par un état de choc avec une chute de la pression artérielle, pâleur, cyanose et troubles de la conscience.

La forme chronique s'associe à une stéatorrhée, météorisme abdominal qui peut entraîner une perte de poids, une perte d'appétit et de l'eczéma. L'allergie aux protéines de lait de vache est une pathologie qui se résout spontanément puisque 90 % des enfants de 6 ans guérissent [53]. L'allergie au lait de vache est principalement liée aux protéines contenues dans le lait. Elles déclenchent une réponse immunitaire inflammatoire [54].

- Les caséines : caséines α 1, caséines α 2, caséines β , caséines κ .
- Les protéines du lactosérum : α -lactalbumine, β -lactoglobulines, immunoglobulines bovines, albumine bovine sérique.

Il n'existe pas de manière documentée, d'allergie au lactose, il s'agit en fait d'une intolérance liée à un déficit en une enzyme, la lactase, qui survient à l'âge adulte, cette intolérance n'entraînera que des troubles digestifs mineurs.

L'intolérance au lactose, qui est beaucoup plus courante, est l'inconfort lié à l'ingestion de lactose chez un individu présentant une déficience en lactase. Cette enzyme décompose le lactose en glucose et galactose directement assimilable par l'organisme, ce qui n'est pas le cas du lactose. En cas d'accumulation de lactose dans l'intestin, il fermente dans le gros intestin en présence de bactéries avec libération de gaz comme le méthane, le dioxyde de carbone et de l'hydrogène [55]. Ce phénomène entraîne une accélération du transit en créant un appel d'eau et des météorismes. Il existe plusieurs degrés d'intolérance au lactose selon la quantité de lactase produite par l'individu. Les symptômes apparaissent entre 30 minutes et 2 heures après l'ingestion de lactose. En France, 30 à 50 % des adultes ont une digestion incomplète du lactose, le déficit congénital en lactase est rare [55].

Le traitement de l'allergie au lait de vache consiste en l'éviction des protéines de lait de vache du régime alimentaire. En cas d'intolérance au lactose, il peut être conseillé des produits appauvris en lactose [53].

D.2.2. Interactions médicamenteuses

Peu d'études à ce jour n'ont été publiées quant à l'interaction entre la prise concomitante de whey et de certains médicaments. Cependant, nous considérerons qu'une

similarité existe entre le lait et les préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait, du fait de la composition qualitativement et/ou quantitativement supérieure en oligoéléments et en protéines complexes à celle du lait. Dans ces conditions, nous pouvons avoir les mêmes hypothèses quant aux interactions médicamenteuses pour les préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait, qu'avec le lait.

Il est documenté que l'administration concomitante de lait, qui est une large source d'ions divalents (calcium et magnésium), peut complexer et provoquer une baisse d'absorption des fluoroquinolones [56]. En effet, la caséine et le calcium présents dans le lait diminuent l'absorption de la ciprofloxacine notamment, ce qui peut conduire à une inefficacité thérapeutique. Il en est de même pour la tétracycline et les cyclines.

De la même manière, la présence de calcium va diminuer l'absorption du lévodopa, de l'albendazole et de l'alendronate. Du fait de l'âge plutôt jeune des consommateurs de whey, le risque se porte principalement sur la diminution de l'absorption des antibiotiques (fluoroquinolone et tétracycline) et de l'albendazole.

Pour les quinolones et les cyclines, il est recommandé de les prendre à jeun, ou au moins 30 min avant la prise de préparations en poudre pour boisson riche en protéines à base de protéines de lactosérum ou 3 h après. Pour les préparations contenant de la caséine on évitera la prise de quinolones et de cyclines après la prise de préparations à base de caséine. En effet, celles-ci sont digérées plus lentement que les préparations à base de lactosérum.

D.2.3. Conséquences sur la densité osseuse

L'ostéoporose est caractérisée par une baisse de la densité osseuse et un risque accru de fractures. L'organisme doit perpétuellement faire face à une modification des paramètres de l'équilibre acido-basique, le pH sanguin est maintenu autour de 7,4 malgré une acidification apportée par le métabolisme. L'activité cellulaire produit du CO₂ et des métabolites acides. L'équilibre acido-basique est régulé par des systèmes tampons comme par exemple : les phosphates, les protéines amphotères (qui peuvent se comporter comme un acide ou une base), le métabolisme hépatique de l'urée, la fonction rénale qui permet la réabsorption des bicarbonates et la sécrétion des ions ammonium, les réserves dans les os d'ions carbonates et de citrates qui sont libérés lors du remodelage osseux (activation des ostéoclastes) [77].

C'est ce dernier processus qui nous intéresse ici, en effet, les systèmes tampons

peuvent être dépassés de manière chronique lorsque l'alimentation génère une production d'acides dans la circulation systémique. On parle d'état d'acidose métabolique latent (AML), qui est associé à une alimentation riche en protéine d'origine animale principalement, qui peut conduire à une déminéralisation osseuse [58][78].

Les aliments acidifiants sont retrouvés en grande majorité dans les aliments d'origine animale. La métabolisation des protéines conduit à la production d'acide chlorhydrique, d'acide sulfurique, d'acide phosphorique et d'acide urique. Notamment, par le fait que les protéines animales contiennent une quantité importante d'acides aminés soufrés et susceptibles de générer des ions sulfates [78].

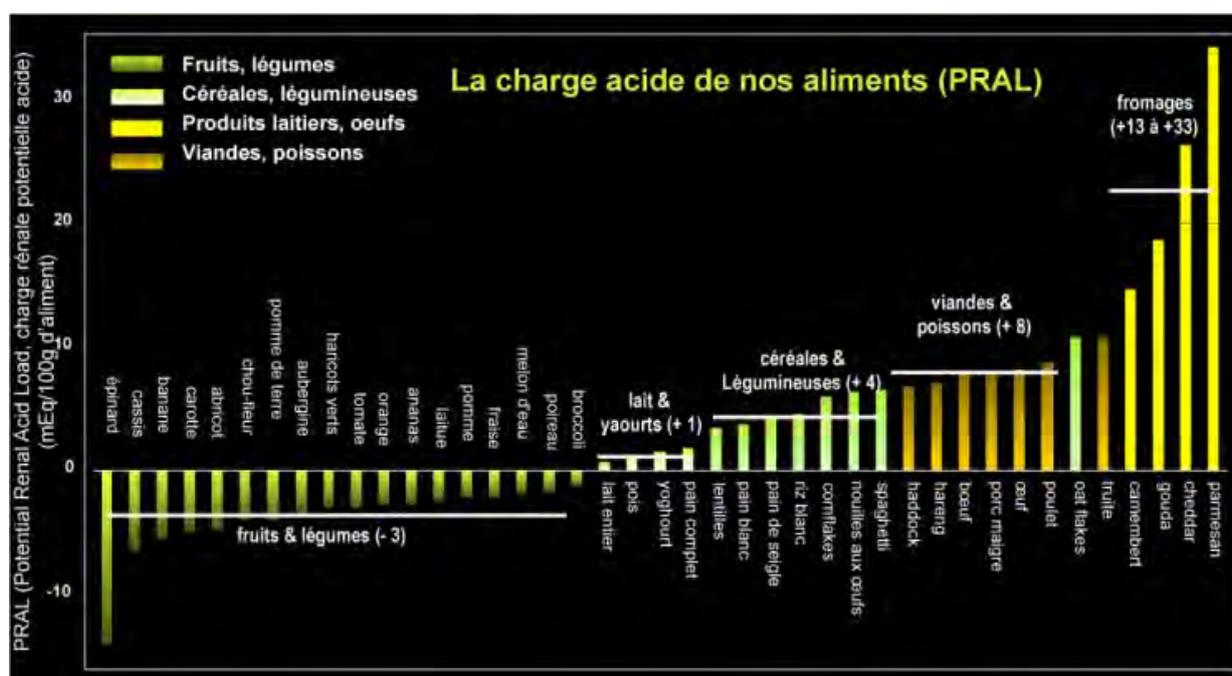


Figure 34 : Représentation de la charge rénale potentielle PRAL (Potential Renal Acid Load). Les valeurs positives sont des aliments acidifiants (viandes, poissons, fromages) et les valeurs négatives sont des aliments alcalinisants (fruits et légumes). D'après Demigné, 2008 selon les données de Remer et Mantz, 1995.

La table de valeurs du PRAL établit une hiérarchie pour le pouvoir acidifiant ou alcalinisant des aliments selon les formules de Remer et Mantz, 1995.

Les aliments alcalins sont les fruits et les légumes. L'impact alcalinisant des fruits et des légumes, repose sur leur fraction minérale, dont les cations, tels que le potassium, le magnésium, ainsi que leur composition anionique dans laquelle prédominent des anions

organiques métabolisables tels que le citrate et le malate.

Outre les produits carnés, les fromages sont susceptibles de contribuer à l'acidification de l'organisme par la production d'ions phosphates après métabolisation. Les yaourts et le lait sont peu acidifiants car ils sont une source importante de calcium [58].

Les préparations contenant du lactosérum et de la caséine sont riches en protéines d'origine animale, ces préparations sont donc acidifiantes pour l'organisme. Néanmoins, il est difficile de définir précisément l'implication de ces macronutriments sur le métabolisme phosphocalcique, et donc de déterminer le niveau d'apport optimal pour l'homéostasie squelettique. De plus, dans l'étude "Dietary protein and calcium interact to influence calcium retention: a controlled feeding study. Am J Clin Nutr. 2009. Hunt JR, Johnson LK, Fariba Roughead ZK", il a été étudié l'impact de l'apport protéique sur l'homéostasie du calcium. En effet, une augmentation de l'absorption du calcium en présence d'un régime riche en protéines animales a été démontrée. Il existe plusieurs raisons qui permettent d'expliquer l'effet bénéfique de l'apport en protéines animales sur la structure osseuse. En plus de l'augmentation de l'absorption du calcium intestinal, l'apport en protéines diminue la résorption osseuse au niveau cellulaire par modulation de l'activité de la phosphatase alcaline osseuse. Egalement, il a été mis en évidence une augmentation de l'IGF-1, un médiateur clé de la santé osseuse et de manière indirecte de l'amélioration de la masse musculaire, lors d'un régime riche en protéines [79]. Les préparations contenant du lactosérum et de la caséine sont une source de calcium, cette caractéristique est bénéfique pour l'homéostasie osseuse [57].

Bien que l'on ait longtemps pensé que les éléments générateurs d'acidité pour l'organisme comme les protéines étaient préjudiciables aux os, les études récentes montrent qu'un apport en protéines animales n'est pas forcément délétère pour la structure osseuse notamment dans des conditions d'apport adéquat en calcium. Les aliments diététiques de l'effort préparés en poudre contenant du lactosérum et de la caséine qui se vendent sur le marché sont naturellement riches en calcium du fait qu'ils soient fabriqués à partir du lait, ceci est une caractéristique intéressante par rapport à la santé osseuse des consommateurs qui sont principalement des sportifs dont l'ossature peut être soumise à de fortes sollicitations.

Il sera quand même intéressant de rappeler au sportif que le maintien de l'homéostasie acido-basique est fondamental pour maintenir un capital osseux sain. Et pour cela, il faudra recommander une alimentation riche et variée en fruits et légumes.

D.3. Effets indésirables inattendus et mésusages des aliments diététiques de l'effort issus du lait

L'apport maximal de protéines est difficile à déterminer en raison d'une grande tolérance aux forts apports protéiques et de l'absence d'éléments convaincants en ce qui concerne le risque métabolique. La limite de 20 % de l'AET établie par l'ANSES correspond pour un individu ayant un régime alimentaire de 2600 kcal/j (besoin énergétique moyen pour un adulte selon l'ANSES) à 130 gr/j de protéines (1 gr protéine = 4 kcal). Pour exemple, si le consommateur suit les recommandations du fabricant EAFIT® pour le produit Pure Whey EAFIT®, soit 2 shakers de 40gr par jour, l'apport sera de 62 gr de protéines uniquement assuré par la préparation. La probabilité de dépasser les 130 gr de protéines par jour pour le consommateur, est forte, notamment à cause de l'alimentation de type occidental que l'on trouve dans la population française.

En cas de surconsommation, les formulations associant protéines de lactosérum et créatine exposent le consommateur (selon l'ANSES) à un risque rénal, surtout en cas de déshydratation (dose maximale recommandée par l'ANSES : 3 gr/j de créatine) [20].

E. Analyse personnelle des gammes de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait

On peut constater qu'au niveau du marketing, les marques n'hésitent pas à utiliser sur leurs emballages, sur leurs sites internet mais également dans leurs campagnes publicitaires, des termes forts pour vanter les mérites de leurs produits. Par exemple, sur Iron Force STC Nutrition® il apparaît sur la boîte les termes « puissance » et « volume musculaire ». En effet, ces allégations sont autorisées car elles ne donnent pas de chiffres sur les gains potentiels. Le pharmacien devra rester vigilant en se focalisant non pas sur les allégations revendiquées, mais sur la composition du produit. Le laboratoire STC Nutrition® distribue ses produits en pharmacie mais aussi en grande distribution, comme la plupart des laboratoires fabricant ce type de préparations protéinées, cet aspect doit renforcer la vigilance du pharmacien quant à la sélection des produits qu'il proposera aux sportifs. Selon l'ANSES, l'achat sur internet des préparations protéinées s'est fortement développé [59].

L'aspect qualitatif et réglementaire des préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait, est un élément important à prendre en compte avant de sélectionner

une gamme pour la distribuer.

Le pharmacien sera attentif à :

- La présence sur l'emballage de toutes les informations obligatoires (description, composition, mode d'utilisation).

- La filière de production du lait (filière classique ou biologique).

- La quantité et la qualité d'additifs artificiels utilisés (édulcorants, colorants, émulsifiants). D'après une étude, (A glance at ... dietary emulsifiers, the human intestinal mucus and microbiome, and dietary fiber. Michael J. Glade. 2016.) les émulsifiants augmentent le passage des bactéries présentes dans la lumière intestinale vers l'intérieur de la barrière épithéliale, tout en favorisant l'inflammation intestinale. Les émulsifiants, de part leur structure à la fois hydrophile et lipophile, permettent une dispersion des graisses, ce qui confère à ces substances des propriétés qui maintiennent la texture, la plasticité et la structure du produit qui les contiennent. Ces émulsifiants interagissent avec les multicouches endogènes des sécrétions du mucus et du tractus intestinal, et peuvent aussi réduire la capacité du mucus d'empêcher le contact entre les micro-organismes et les cellules épithéliales, de ce fait ils pourraient accroître le processus inflammatoire décrit plus haut.

- La méthode de séparation du lactosérum (thermocoagulation, chromatographie par échanges d'ions, microfiltration, ultrafiltration) : l'ultrafiltration est à privilégier pour une meilleure qualité d'obtention du lactosérum. Elle limite la présence de matières grasses et de glucides (notamment de lactose).

- La présence ou non de lactose : l'absence de lactose favorise la digestibilité de la préparation.

- L'ajout d'additifs améliorant la digestibilité comme par exemple les probiotiques ou des enzymes digestives.

- Rapport qualité/prix.

- L'association de protéines de lactosérum avec de la créatine, taurine, glutamine et autres acides-aminés doit être considérée avec prudence. En effet, pour le consommateur averti cela peut être un avantage mais pour le consommateur de base, il y a un risque de surconsommation et une multiplication du risque de provoquer un mésusage.

PARTIE 3
Réglementation

Les aliments pour sportifs doivent respecter les dispositions du règlement (CE) n° 178/2002 («législation alimentaire générale»). Ils sont classés en tant que denrées alimentaires de consommation courante et régies par les règles horizontales de la législation alimentaire (Source : www.ec.europa.eu. Rapport de la commission au parlement Européen et au conseil, sur les denrées alimentaires destinées aux sportifs. 06/2016.).

A. Définition des denrées alimentaires destinées aux sportifs :

Ces produits doivent répondre aux exigences applicables de certaines des dispositions horizontales de la législation alimentaire :

- Le règlement (CE) n°1924/2006 concernant les allégations nutritionnelles et de santé portant sur les denrées alimentaires.
- Le règlement (CE) n°1925/2006 concernant l'adjonction de vitamines, de minéraux et de certaines autres substances aux denrées alimentaires (aliments dits «enrichis») [60].
- Le règlement (UE) n°1169/2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires.

B. Information des consommateurs

B.1. Etiquetage et informations

Le règlement (UE) 1169/2011 contient les dispositions de base permettant d'assurer un niveau élevé de protection des consommateurs en matière d'informations sur les denrées alimentaires. Il permet aux consommateurs de choisir les produits qu'ils vont consommer en toute connaissance de cause. Egalement, ce dispositif permet de garantir la libre circulation des denrées alimentaires au sein de l'UE, notamment en harmonisant les informations. Ce règlement s'applique aux exploitants du secteur alimentaire à tous les stades de la chaîne alimentaire lorsque leurs activités concernent l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires. Il s'applique à toutes les denrées alimentaires destinées au consommateur final, y compris celles servies par les collectivités, ou destinées à être livrées à des collectivités.

Les principes généraux de cette réglementation sont les suivants :

- Permettre un niveau élevé de protection de la santé et des intérêts des consommateurs en fournissant les informations utiles.

- Il rend l'exploitant qui commercialise ou importe la denrée alimentaire, responsable de son étiquetage.
- Le règlement fixe les informations obligatoires sur les denrées alimentaires, en l'occurrence :
 - Les informations sur l'identité et la composition, les propriétés ou autres caractéristiques de la denrée.
 - La liste des ingrédients.
 - Les ingrédients provoquant des allergies ou des intolérances, utilisés dans la fabrication ou la préparation d'une denrée alimentaire et encore présents dans le produit fini, même sous une forme modifiée .
 - La quantité nette de la denrée.
 - La quantité de certains ingrédients, notamment lorsque la dénomination de la denrée alimentaire laisse penser à la présence majoritaire d'un ingrédient.
 - La date limite de consommation (DLC) ou la date de durabilité minimale (DDM).
 - Les conditions particulières de conservation.
 - Les conditions particulières d'utilisation.
 - Le nom ou la raison sociale et l'adresse de l'exploitant du secteur alimentaire.
 - Le pays d'origine ou le lieu de provenance.
 - Un mode d'emploi, lorsque son absence rendrait difficile un usage approprié de la denrée alimentaire.
 - Pour les boissons titrant plus de 1,2 % d'alcool en volume, le titre alcoométrique volumique acquis.
 - Une déclaration nutritionnelle qui correspond : la valeur énergétique, la teneur en lipides (dont les acides gras saturés), la teneur en glucides (dont les sucres simples), la teneur en protéines, sel. Ces valeurs doivent être exprimées pour 100 g ou 100 mL de produit et figurer dans un même champ visuel.

B.2. Composition

En terme de composition, les aliments diététiques de l'effort doivent répondre au règlement (CE) n°1925/2006, ce sont des aliments dits enrichis.

Les exigences concernant l'adjonction de vitamines et de minéraux sont les suivantes :

- Seules les vitamines et/ou minéraux énumérés dans l'**annexe 2** peuvent être ajoutés.

- Seules les formules vitaminiques et les substances minérales énumérées dans l'**annexe 3** peuvent être ajoutées.
- Les quantités maximales et minimales de vitamines et de minéraux qui peuvent être ajoutés aux denrées alimentaires et toute condition qui s'y rattache sont fixées par l'article 6 du règlement (CE) n°1925/2006.
- Substances interdites ou sous contrôle communautaire voir **annexe 4**.

B.3. Allégations

L'étiquetage, la présentation ainsi que la publicité ne doivent contenir aucune mention affirmant ou laissant entendre qu'un régime alimentaire équilibré et varié ne constitue pas une source suffisante de substances nutritives pour l'organisme.

L'étiquetage ne doit pas tromper ou induire en erreur le consommateur quant à l'avantage nutritionnel que l'aliment est susceptible d'offrir à la suite d'adjonction de ces nutriments.

L'étiquetage doit fournir les informations conformément à l'article 30, paragraphe 1, du règlement (UE) n°1169/2011 du Parlement européen et du Conseil du 25 octobre 2011 concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires (JO L 304 du 22.11.2011, p. 18) ainsi que les quantités totales de vitamines et de minéraux lorsqu'ils sont ajoutés à l'aliment. Il peut comporter une mention relative à cet ajout dans les conditions fixées dans le règlement (CE) n°1924/2006.

Allégations autorisées sur l'emballage des aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait préparés en poudre pour boisson riche en protéines par la Commission européenne qui figurent dans le règlement (UE) n°432/2012 :

- Les protéines contribuent à augmenter la masse musculaire. L'allégation ne peut être utilisée que pour une denrée alimentaire qui est au moins une source de protéines au sens de l'allégation source de protéines définie dans l'annexe du règlement (CE) n° 1924/2006.
- Les protéines contribuent au maintien de la masse musculaire. L'allégation ne peut être utilisée que pour une denrée alimentaire qui est au moins une source de protéines au sens de l'allégation source de protéines définie dans l'annexe du règlement (CE) n°

1924/2006.

- Les protéines contribuent au maintien d'une ossature normale. L'allégation ne peut être utilisée que pour une denrée alimentaire qui est au moins une source de protéines au sens de l'allégation source de protéines définie dans l'annexe du règlement (CE) n° 1924/2006.

C. Nutrivigilance

Dans le cadre des obligations générales du droit alimentaire, les producteurs doivent répondre aux critères imposés par le règlement (CE) n°178/2002 en matière de conformité, de traçabilité et d'information des consommateurs.

En plus de ces obligations, un système de surveillance sanitaire dont l'objectif est d'améliorer la sécurité du consommateur en identifiant rapidement d'éventuels effets indésirables liés à la consommation de compléments alimentaires, aliments ou boissons enrichis, nouveaux aliments et nouveaux ingrédients (des aliments qui n'étaient pas consommés en Europe avant 1997) et des produits destinés à l'alimentation de populations particulières existe. Il s'agit du dispositif : nutrivigilance confiée à l'ANSES mis en place en 2009 par la loi hôpital, patients, santé et territoires. Les professionnels de santé (médecin, pharmacien, diététicien...) et les particuliers peuvent faire une déclaration sur un formulaire en ligne (<https://pro.anses.fr/nutrivigilance/>), ces déclarations sont analysées par une cellule de nutrivigilance de l'ANSES avec l'appui d'experts. Après évaluation, l'ANSES donne un avis consultable également en ligne. En cas d'imputabilité forte et de sévérité élevée, l'agence alerte les pouvoirs publics pour que des mesures soient prises.

Au niveau national c'est la DGCCRF (Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes) qui est en charge des contrôles de conformité auprès des acteurs du secteur (fabricants, fournisseurs, distributeurs), elle veille à ce que les produits alimentaires mis sur le marché ne nuisent pas à la santé des consommateurs, pour cela elle surveille le respect des bonnes pratiques d'hygiène et recherche des agents chimiques ou biologiques pouvant engendrer des risques pour la santé. Grâce aux expertises de l'ANSES, la DGCCRF renforce la réglementation dès que cela est nécessaire et modifie la liste des substances autorisées, les teneurs maximales et les recommandations sanitaires. Ces nouvelles mesures ou le dépassement de seuils d'alerte peuvent conduire la DGCCRF en cas

de danger grave ou immédiat à mettre en place des obligations d'informations, des injonctions de mise en conformité des produits, des retraits de lots, des rappels de lots et des suspensions de commercialisation.

Ces mesures sont proportionnées au danger, elles peuvent être des mesures temporaires (arrêtés d'urgence, d'une validité maximale d'un an selon le Code de la consommation article L 221.5) ou permanentes (permet de prendre décrets visant à définir des règles de sécurité pour des produits présentant des risques pour la santé selon le Code de la consommation l'article L221-3).

L'application des mesures engagées suivent une procédure de gestion des alertes : le guide de gestion des alertes de 2009. Cette procédure se déroule en quatre étapes :

- Informer le fournisseur.
- Prendre des mesures de gestion portant sur le devenir des denrées concernées : retrait de lots, rappel de lots. Le retrait et le rappel de lots relève de la responsabilité du professionnel détenteur de ces produits. Le rappel a un double objectif : soustraire des personnes qui détiendraient des produits incriminés de l'exposition au danger, alerter les personnes ayant été exposées afin qu'elles puissent être prises en charge médicalement si nécessaire.
- La communication des informations doit se faire rapidement, c'est l'exploitant et dans certains cas l'administration qui va communiquer l'alerte. La communication se fera par la mise en place d'affichettes apposées sur les lieux de vente. Et par des communiqués dans la presse locale, régionale et nationale.
- Rechercher les causes de la non-conformité constatée et mettre en oeuvre les mesures correctives ou préventives au sein de l'établissement de production ou de distribution. Cette dernière étape permet de mettre fin à la situation d'alerte.

A titre informatif, un cas d'effet indésirable déclaré référence 2013-078 est lié à la consommation d'isolat protéique de lactosérum. D'imputabilité vraisemblable (la mise en cause du produit est probable), ce cas est d'une sévérité de niveau 3 sur une échelle de 4 :

- Age du consommateur : 22 ans.
- Poids du consommateur : inconnu.
- Cadre de l'utilisation de l'isolat protéique de lactosérum : récupération musculaire.
- Sport pratiqué : musculation.
- Posologie : 40 g/semaine.
- Effet indésirable : Homme de 22 ans, sans antécédent médical rapporté, pratiquant la

musculature depuis plus de deux ans et consommant depuis trois mois un isolat protéique de lactosérum. A la suite d'un voyage à l'étranger, il est hospitalisé en médecine interne pour un syndrome inflammatoire inauguré par une gastroentérite et d'étiologie indéterminée malgré un bilan infectieux et immunologique exhaustif. Il s'y associe une insuffisance rénale sans protéinurie significative avec un diagnostic histologique de néphropathie interstitielle. L'évolution et les traitements ne sont pas précisés.

- Lieu de l'achat : internet.

Ce cas met en relief l'importance de la déclaration des effets indésirables pour améliorer la sécurité des consommateurs [23].

De 2009 (mise en place du dispositif nutrivigilance) à 2016, 49 signalements d'effets indésirables susceptibles d'être liés à la consommation de compléments alimentaires destinés aux sportifs ont été signalés, une seule déclaration concerne les aliments diététiques de l'effort contenant des protéines de lactosérum (référence 2013-078 détaillée précédemment) [20]. Le dernier bilan de nutrivigilance de 2019 n'a pas révélé d'effets indésirables liés à la consommation de produits contenant des protéines de lait.

D. Label AFNOR

A la demande du ministère des sports face à l'augmentation du marché des aliments diététiques de l'effort, l'organisme AFNOR a été contacté pour créer une norme pour différencier les fabricants de produits de nutrition sportive. Ces laboratoires pratiquent les meilleures méthodes de fabrication répondant à des normes qui entrent dans le cadre d'une démarche collective qui se base sur un consensus d'un grand nombre d'organismes. Cette norme permet de valider des exigences relatives à la conception, au développement et à la fabrication, non seulement des compléments alimentaires, mais également des aliments diététiques de l'effort.

AFNOR (Association française de normalisation) est une association reconnue d'utilité publique, elle représente la France auprès de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) et du Comité européen de normalisation (CEN).

Les exigences de la norme imposent à ce que le fabricant conserve des échantillons des produits finis une fois le produit mis sur le marché. Elle demande des bonnes pratiques pour le choix des ingrédients, des fournisseurs et la fabrication. La norme reprend la liste des

substances interdites qui est publiée chaque année par l'Agence mondiale contre le dopage et bien sûr, demande aux fabricants d'éliminer ces substances des produits fabriqués.

Au niveau de l'emballage permettant aux consommateurs d'identifier un produit répondant à la norme, on retrouve une étiquette comme celle-ci :



PARTIE 4
Conseil officinal

Le pharmacien, en tant que professionnel de santé, possède des connaissances en matière d'usage et de mésusage des produits visant à la santé humaine et sur la législation de ceux-ci. Il est donc compétent pour la délivrance des aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait. Il est capable d'identifier les produits inefficaces voire dangereux pour les sportifs et ainsi d'éviter la distribution de ces produits. Cette qualité est d'autant plus importante lorsqu'on considère la forte méconnaissance du public vis à vis de ces produits et du marketing agressif que pratiquent les laboratoires pour vendre toujours plus de produits (développement de gammes bio et vegan, présence sur les réseaux sociaux et ventes en ligne) et de s'étendre sur des profils de consommateurs de plus en plus larges.

Le pharmacien engage sa responsabilité et son image lors de la dispensation de ceux-ci y compris lors d'éventuelles interactions avec d'autres produits. Son rôle de préservation de la santé publique est un des piliers de sa raison d'être. Pour cela, il doit lutter contre le charlatanisme et ne pas proposer à la consommation des produits comportant des allégations trompeuses.

A. Responsabilité du pharmacien

Un pharmacien qui manquerait aux bonnes pratiques et qui occasionnerait un dommage à un individu pourrait à la fois devoir rendre des comptes devant ses pairs, devant un juge civil et pénal [63].

- La responsabilité disciplinaire : est celle qui sanctionne un manquement aux obligations professionnelles et à la déontologie professionnelle. Une faute disciplinaire peut entraîner différents types de sanctions qui va de l'avertissement à l'interdiction d'exercer.

- La responsabilité civile est l'obligation pour un pharmacien de réparer un dommage causé à un tiers (patient, sportif, client). Ici, la faute porte atteinte à un intérêt privé, celui de la victime. Il s'agit le plus souvent d'un manquement à une obligation légale ou réglementaire.

- La responsabilité pénale : quand elle sanctionne un fait qui a troublé l'ordre public, qu'il ait ou non entraîné un préjudice pour un tiers, la sanction est sous la forme d'une amende ou d'un emprisonnement. En l'occurrence, par exemple, vendre dans son officine des produits d'importation non enregistrés correctement et donc potentiellement dangereux, engage la responsabilité pénale.

B. Sélection des gammes et achats

Le pharmacien, de par sa place au sein du circuit de santé et de sa proximité auprès du sportif, est un client potentiel privilégié pour les laboratoires de compléments alimentaires. Le pharmacien est l'intermédiaire entre le fabricant et le consommateur. Il est important de comprendre la relation qui se créera afin de ne pas tomber dans des dérives purement commerciales.

Pour cela, le pharmacien devra s'appuyer sur un processus d'analyse de la gamme, comme nous avons pu le voir en **partie 2 (E. Analyse personnelle des gammes de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait)**, et des besoins des sportifs qui viennent demander conseils :

- Origine de la fabrication FRANCE ou UE.
- Labellisation (AFNOR, normes ISO, label agriculture biologique).
- Composition du produit (macronutriments, micronutriments, complexes, plantes, additifs...).
- Mode de fabrication (ultrafiltration, chromatographie à échanges d'ions...).
- Rapport qualité/prix.
- Notoriété de la marque.

C. Conseils et prise en charge du sportif lors d'une vente d'aliments diététiques de l'effort préparés en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait

C.1. Evaluation des besoins énergétiques

Dans un premier temps, pour évaluer correctement les besoins et les demandes du sportif il peut être intéressant de s'aider d'un questionnaire que j'ai rédigé afin de rassembler correctement l'ensemble des informations nécessaire à la prise de décision :

Questionnaire d'orientation des sportifs à l'officine dans le cadre d'une supplémentation en aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait préparés en poudre				
Activité				
Type de sport	Force		Mixte	Endurance
Objectif	Prise de masse		Maintien	
Niveau	Loisir		Compétition	
Nombres d'entraînements par semaine et durée (Convertir en METS)				
Travail	Bureau	Mixte		Manuel
Nombres d'heures de travail par semaine, prendre en compte activités domestiques (Convertir en METS)				
Régime alimentaire				
Nombre de repas journaliers	1	2	3	4
Repas équilibré*	Oui		Non	
Junk food** par semaine	0	1	2	3 et +
Age (an)				
Poids (kg)				
Taille (m)				
Estimation des dépenses énergétiques journalières (kcal)	MB + Activité physique journalière			
Besoins protéiques journaliers (g/j)	(Dépenses énergétiques journalières x 0,15 (15% AET))/4 = Quantité de protéines totales par jour (g/j). Conversion en g/kg/j : Besoins protéiques journaliers/poids (kg)			

*Un repas équilibré correspond à un repas présentant un produit céréalier ou un féculent, une portion de légumes, une portion de protéines, une source de matière grasse (huile végétale,

beurre...), un produit laitier et une portion de fruits.

****La Junk food est une nourriture riche en calories, composée essentiellement de macronutriments à faible valeur nutritive : proportion importante de sucres rapides et d'acides gras saturés. Il doit être rappelé que ce type d'alimentation est mauvais pour la santé et néfaste pour les performances sportives [96].**

Après avoir rassemblé les principales informations, le pharmacien doit les analyser pour valider la demande du sportif ou réorienter celui-ci sur des compléments alimentaires multi-vitaminés ou simplement faire un rééquilibrage diététique. **Pour les personnes ayant une dépense énergétique faible à modérée (NAP = 1,4 à 2 ou NAP = 1 = Métabolisme de base) selon l'ANSES, il n'est pas nécessaire de changer l'équilibre des apports en macronutriments [9]. En d'autres termes, en dessous de 2 heures d'activité sportive par semaine il n'est pas recommandé de conseiller une supplémentation en protéines.**

- Les recommandations selon l'INSEP sont pour l'apport protéique [17][28][64][65] :

- > 1,2 à 1,4 g/kg/J pour les sportifs d'endurance.
- > 1,3 à 1,5 g/kg/J pour le maintien de la masse musculaire chez les sportifs de force.
- > 1,8 à 2 g/kg/J pour une prise de masse chez les sportifs de force, sans dépasser 2,5 g/kg/J sur une période de 3 mois maximum.

- Il faut également rappeler que les protéines de lait en poudre ne sont que des aliments diététiques de l'effort issus du lait, ils doivent donc s'insérer dans un régime alimentaire adapté et équilibré à l'activité physique, pour cela nous pouvons rappeler qu'il est important de savoir évaluer les besoins nutritionnels en fonction des caractéristiques propres à chaque individu (âge, sexe, poids) et de son activité. Il sera bon de rappeler une méthode de calcul du métabolisme de base (MB) auquel on ajoute les dépenses énergétiques liées à l'activité :

> Formule de Black et al. (1996) :

Homme : MB (kcal) = 259 x((Poids kg)^{0,48} x (Taille m)^{0,50} x (Age an)^{-0,13}).

Femme : MB (kcal) = 230 x((Poids kg)^{0,48} x (Taille m)^{0,50} x (Age an)^{-0,13}).

> L'évaluation des dépenses caloriques consécutives à un effort physique est beaucoup plus difficile étant donné que de nombreux facteurs peuvent influencer le résultat. La méthode la plus fiable est la calorimétrie directe qui mesure directement la chaleur émise par le corps (métabolisme de base + activité physique) mais qui nécessite un matériel lourd.

> Nous utiliserons la méthode suivante (selon Ainsworth BE et al., Compendium of physical activities: classification of energy costs of human physical activities. Med Sci Sports Exerc. 1993.) :

$$\text{Dépenses énergétiques journalières} = \text{MB} + (\text{coût énergétique (en METS)} \times \text{durée de chaque activité}).$$

L'équivalent métabolique (**Metabolic Equivalent of Task ou MET**) est le rapport du coût énergétique de l'activité sur le coût énergétique du métabolisme de base. Il s'agit d'une approximation et n'a pas de valeur précise pour un individu X.

$$\text{MET} = \text{Activité physique} / \text{Activité du métabolisme de base}.$$

1 MET = 1 kcal/kg/h qui correspond à la consommation de 3,5 ml d'O₂/kg/min, c'est aussi la consommation d'O₂ au repos.

Tableau 14 : coûts énergétiques (en METS) en fonction de l'activité d'après Ainsworth et al. 2000 [66] modifié en 2011 la liste complète est disponible sur <https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/home> :

Activité physique	METS
Allongé en silence	1
Assis en silence	1,3
Travail de bureau simple	1,5
Debout en s'agitant (activité d'un sédentaire)	1,8
Marche 5 km/h (plaisir, balade, pause)	3,5
Musculation en résistance (exercices multiples en série de 8-15 répétitions)	3,5
Marche 6,5 km/h	5
Natation récréative (lac, océan, rivière)	6
Vélo intensité moyenne (16-19,2 km/h, effort léger)	7
Jogging 10km/h	7
Football récréatif	7
Squash récréatif	7,3
Tennis simple	8
Hockey (entraînement)	8
Rugby à quinze (compétition)	8,3
Boxe sur ring	12,8
Course à pied 16 km/h	14,5

> Grâce à ces outils, on pourra évaluer les besoins énergétiques journaliers et ainsi mieux établir les apports protéinés. On lui conseillera également d'optimiser la posologie des suppléments protéinés en fonction.

> Exemple d'un sportif homme de 25 ans, pesant 75 kg, mesurant 1,80 m, et pratiquant trois fois par semaine 1 heure de musculation, une fois 2 heures de vélo d'intensité moyenne par semaine et un travail de bureau (40 heures par semaine), le reste de l'activité hebdomadaire (168 h – (sommeil hebdomadaire : 8 x 7) – (travail + sport : 45h) = 67 h) 67 h sera considéré comme une activité d'un sédentaire debout s'agitant (MET = 1,8) :

$$\text{MB} = 259 \times ((75)^{0,48} \times (1,80)^{0,50} \times (25)^{-0,13}) = 1816,5 \text{ kcal}$$

MB est la dépense énergétique journalière du sportif lorsque celui-ci est totalement au repos soit par heure : $1816,5/24 = 75,6875 \text{ kcal/h}$.

Soit 1 MET en kcal/h pour ce sujet = 75 kcal/h

Dépenses énergétiques liées au sport par semaine = $(3,5 \times 3) + (7 \times 2) = 24,5 \text{ METS}$ ce qui correspond en kcal à $24,5 \times 75 = 1837,5 \text{ kcal}$

Dépenses énergétiques au travail par semaine = $(1,5 \times 40) = 60 \text{ METS}$ ce qui correspond en kcal à $60 \times 75 = 4500 \text{ kcal}$

Dépenses énergétiques hebdomadaire en dehors du sport et du travail = $(67 \times 1,8) = 120,6 \text{ METS}$ ce qui correspond en kcal à $120,6 \times 75 = 9045 \text{ kcal}$

Activité physique journalière = $(1837,5 + 4500 + 9045) / 7 = 2197,5 \text{ kcal/j}$

Dépenses énergétiques hebdomadaires pendant le sommeil = temps de sommeil x MB en kcal/h = $56 \times 75,7 = 4239,2 \text{ kcal}$

Dépenses énergétiques journalières pendant le sommeil = $4239,2/7 = 605,6 \text{ kcal}$

Donc : Dépenses énergétiques journalière totale = $2197,5 + 605,6 = \underline{2803,1 \text{ kcal}}$

Part des protéines dans le régime alimentaire = 15 % AET qui est le milieu de l'intervalle conseillé par l'ANSES soit $(2803,1 \times 0,15) / 4$ (1 gr = 4 kcal) = 105,1 g de protéines/jour ou 1,40 g/kg/j.

> Le contrôle exercé par l'apport en protéines d'origine alimentaire sur la synthèse protéique musculaire est un processus saturable. Selon l'étude, "Ingested protein dose response of muscle and albumin protein synthesis after resistance exercise in young men. Moore DR. Robinson MJ. Et al. Am. J. Clin. Nutr. 2009", la saturation du processus est

atteinte pour un apport de 20 gr de protéines chez des sujets ayant en moyenne un poids corporel de 86 kg soit 0,24 g/kg de poids corporel [80].

> Par mesure de précaution, lors du calcul des besoins protéiques journaliers. Il faudra choisir 15 % des AET pour les besoins protéiques sans dépasser 2 g/kg/j pour les sportifs de force en période de prise de masse, 1,5 g/kg/j pour les sportifs de force en maintien de masse musculaire et 1,4 g/kg/j pour les sportifs d'endurance.

> Une méthode simple mais efficace pour évaluer la balance apport et dépense énergétique est simplement la surveillance du poids de corps. On peut recommander au sportif de se peser une fois par semaine le matin à jeûn pour évaluer la justesse de son régime alimentaire. S'il prend ou perd du poids, il devra réévaluer ses besoins énergétiques.

C.2. Informer le sportif des possibles effets indésirables et des risques d'interactions, contre-indication

Comme nous avons pu le voir précédemment, la prise quotidienne de protéines de lactosérum en poudre peut s'accompagner d'inconvénients. On déconseillera la prise de cet aliment diététique de l'effort aux adolescents, notamment ceux qui sont touchés par de l'acné. Évidemment, il faudra demander au sportif s'il n'a pas d'intolérance ou d'allergie au lait de vache. En pratique, on note souvent chez le consommateur de protéines de lactosérum en poudre, notamment lors de l'introduction du supplément, des ballonnements, flatulences et des modifications du transit, ceux-ci proviennent de l'apport en lactose qui est supérieur aux habitudes alimentaires. Il peut se produire une fermentation du lactose conduisant aux effets cités plus haut. En général, les effets disparaissent après quelques jours d'utilisation. Si les effets perdurent, il faudra, soit changer de marque ou arrêter définitivement. Pour anticiper ce problème, on peut conseiller des probiotiques qui amélioreront la digestibilité ou des protéines de lactosérum qui sont pauvres en lactose (coût supérieur).

Il faudra rappeler que la prise de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait, peut provoquer des interactions avec la prise de certains médicaments. Comme nous l'avons vu plus haut, la prise de ces suppléments protéinés de manière rapprochée avec les quinolones ou les cyclines peut diminuer leur absorption et leur efficacité. Il sera important de préciser qu'en cas de prise de ces médicaments, il faudra suspendre la supplémentation afin d'éviter un risque d'interaction, ou bien de décaler la prise de plusieurs heures avec celle du médicament. S'il s'agit d'une préparation contenant de la caséine, elle

devra être arrêtée.

Pour les sportifs présentant une suspicion d'insuffisance rénale, d'une insuffisance rénale avérée, nous contre-indiquerons la prise d'aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait pour les raisons énumérées plus haut dans ce travail.

Une fois le conseil et la vente effectués, il est recommandé de suivre le sportif dans la prise du supplément protéiné, notamment pour se renseigner sur la tolérance digestive du sportif au produit. Dans le cadre de la nutrivigilance, le pharmacien devra se tenir informé quand à la survenue d'effets indésirables durant toute la prise du supplément, en cas, par exemple, d'allergies ou de troubles gastro-intestinaux graves. Le pharmacien doit contacter l'ANSES pour déclarer l'effet indésirable via leur site internet (www.nutrivigilance-anses.fr).

C.3. Posologie et conditions de prise

Par principe de précaution, on déconseillera la prise d'aliments diététiques de l'effort à base de lactosérum aux personnes présentant une altération de la fonction rénale ou hépatique. On déconseillera également la prise de ses aliments aux enfants, adolescents, ainsi qu'aux femmes enceintes ou allaitantes.

Comme nous avons pu le voir précédemment dans la méta-analyse et selon l'ANSES, il n'est pas utile de conseiller des aliments diététiques de l'effort à base de lactosérum chez les débutants, et également, que l'alimentation peut suffire à couvrir l'ensemble des besoins [41].

Il faudra rappeler aux sportifs, après évaluation de leurs dépenses énergétiques, la quantité d'aliments diététiques de l'effort à prendre. La posologie maximale conseillée des protéines de lactosérum en poudre est de 20 grammes (selon l'ANSES) de protéines par jour tous les jours, à adapter en fonction de chaque sportif. En effet, comme nous avons pu le voir dans l'étude de Moore DR. Robinson MJ. Et al. Am. J. Clin. Nutr. 2009 ([80]) la synthèse protéique musculaire est un processus saturable. Un apport supérieur à 0,24 g/kg de poids corporel de protéines est inutile, que se soit pour le gain de masse musculaire ou le maintien musculaire. Ainsi, pour un sportif (femme et homme) ayant un poids de corps inférieur à 80 kg il sera judicieux d'adapter la posologie à un apport par prise a 0,24 g/kg de protéines.

Exemple avec le produit Premium Whey de STC Nutrition® dans le cas d'un sportif (boxe) pesant 65 kg désirant augmenter sa masse musculaire :

- Composition en protéines pour une dose de 25 g de poudre : 20 g de protéines de lactosérum. Soit 0,8 g de protéines pour 1 g de poudre.

- Quantité idéale de protéines pour le sportif dans le cadre d'une supplémentation : $0,24 \times 65 = 15,6$ g.

- Quantité idéale de poudre de Premium Whey de STC Nutrition® pour le sportif : $15,6 / 0,8 = 19,5$ g.

De préférence, la prise doit de se faire immédiatement après l'entraînement. Les protéines de lactosérum ont une assimilation rapide, ainsi on profite au maximum de la phase d'anabolisme post-entraînement (comme vu plus haut en amont), ou durant l'après-midi s'il n'y a pas d'activité.

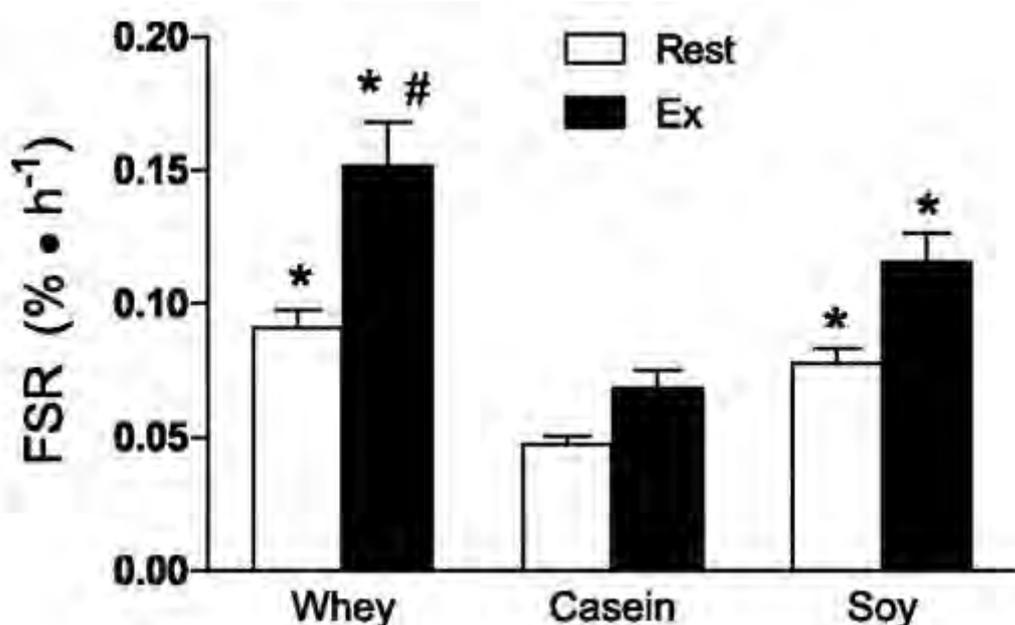


Figure 35 : Flux de synthèse protéiques musculaires (à l'issue d'un exercice de musculation) mesuré pendant 3 h après l'ingestion de 10 g d'acides aminés provenant de protéines de lactosérum, caséines ou de soja. D'après, Tang. JE. Moore DR. Et al. Ingestio, of whey hydrolysate, casein, or soy protein isolate : effets on mixed muscle protein synthesis at rest and following resistance exercise in young men. J. Appl. Physiol. 2009.

En effet, différentes études concordantes permettent de suggérer que l'anabolisme musculaire est favorisé par un apport protéique précoce dès la fin de l'exercice (augmentation du flux de synthèses des protéines musculaires figure 35) [81][82].

Il est recommandé lors de prise sur une longue durée, de pratiquer des pauses au cours de l'année.

En cas de modification du niveau d'intensité de l'activité ou de sa fréquence, il sera bon de lui rappeler qu'il devra adapter la posologie voire faire une pause dans la prise, en cas d'un entraînement intensif de longue durée ou de prise de vacances par exemple.

En résumé :

- **Il ne doit pas être conseillé d'aliments diététiques de l'effort à base de lactosérum chez les sportifs pratiquant 2 heures ou moins d'activité sportive par semaine.**
- **Avant l'introduction d'une supplémentation en aliments diététiques de l'effort à base de lactosérum, un bilan des besoins énergétiques et protéiques journaliers du sportif doit être effectué. Le bilan doit être réévalué si l'activité est modifiée.**
- **Par mesure de précaution, lors du calcul des besoins protéiques journaliers, il faudra choisir 15 % des AET pour les besoins protéiques sans dépasser 2 g/kg/j pour les sportifs de force en période de prise de masse, 1,5 g/kg/j pour les sportifs de force en maintien de masse musculaire et 1,4 g/kg/j pour les sportifs d'endurance.**
- **La dose de supplément devra être adaptée à chaque sportif en fonction de son poids. En l'occurrence, 0,24 g/kg de protéines par dose sans dépasser 20 g de protéines. A prendre immédiatement après la fin de l'effort.**
- **Surveiller la survenue d'évènements indésirables, et prévenir le risque d'interactions médicamenteuses.**

D. Constat : diversification des aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait

Les aliments diététiques de l'effort sont vendus sous de multiples formes (poudres pour préparation riche en protéines issues du lait, barres, boissons...) et sont des aliments pour

sportifs. Ils répondent à la réglementation des denrées alimentaires de consommation courante et régies par les règles horizontales de la législation alimentaire.

Il se pose cependant une question essentielle par rapport à la distribution de ces denrées alimentaires en officine : ces aliments diététiques de l'effort sont-ils indispensables pour les sportifs ?

Selon l'ANSES, si le sportif a une activité physique modérée, une alimentation courante équilibrée suffit à elle seule. Pour un sportif de haut niveau avec une forte charge d'entraînement, des apports spécifiques peuvent lui être conseillés, en plus d'une alimentation équilibrée, avant tout à partir d'aliments courants. Certains aliments diététiques de l'effort disponibles sur internet et ne répondant pas aux réglementations sont susceptibles de contenir des substances figurant sur la liste des interdictions du Code mondial antidopage. Ces suppléments adultérés contenant une substance interdite ajoutée par le fabricant sans en faire mention sur l'étiquetage, sont plus courants que l'on pourrait penser sur internet. Selon l'étude «Analysis of non-hormonal nutritional supplements for anabolic-androgenic steroids results of an international study», de H. Geyer, K. Koehler, et al, Int. J. Sports Med. 2004, l'analyse du contenu exact de plus de 630 aliments pour sportifs provenant de 13 pays différents, a montré que 14,8 % de ces suppléments contenaient des stéroïdes anabolisants [67].

Malgré ces recommandations, la consommation des protéines en poudre est en constante progression ces dernières années (4 % de progression par an) que se soit au niveau mondial ou national [68]. Il en résulte une évolution considérable des profils d'acheteurs de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait. Il y a 15 ans, les consommateurs étaient principalement des bodybuilders et des athlètes, aujourd'hui il y a de plus en plus de consommation par les sportifs récréatifs. Les principaux facteurs qui influencent l'achat de protéines en poudre ne sont pas le genre et les revenus, mais le type d'exercice pratiqué [68]. Le désir de force et de puissance est un facteur clé, l'endurance est un facteur prenant de plus en plus de place dans le secteur. Il existe aussi un facteur économique qui a permis une augmentation importante du marché, l'augmentation de la production laitière suite à la suppression des quotas laitiers de l'UE, a favorisé la baisse du coût de production des protéines de lactosérum.

Au milieu de ce marché, le pharmacien d'officine a un rôle important dans la distribution de ces produits, en amenant des compétences, en sélectionnant les gammes de produits adaptés, conformes à la réglementation et labellisés garantissant un haut niveau de qualité. Mais également, directement auprès du consommateur en tant qu'acteur de proximité pour réorienter, conseiller, avertir et prévenir. Le pharmacien pourra ainsi assurer la

délivrance de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait au sein de son officine, qui sera associée à un conseil personnalisé et un produit adapté. Cette méthodologie garantira une fidélisation des sportifs demandant conseils, grâce à la confiance qui s'installera entre le professionnel et le sportif, et une réduction des risques pour le sportif en lui évitant d'être confronté à des méthodes de ventes poussées et déraisonnées.

Conclusion

D'un côté nous avons les fabricants d'aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait, qui ne cessent d'étendre leur gamme en intégrant diverses substances (créatine, carnitine, taurine) à leurs préparations tout en utilisant des stratégies de marketing et de ventes de plus en plus agressives (vente en ligne, utilisation d'influenceurs via les réseaux sociaux, packaging vantant les effets du produit, présence de préparations adultérées dans des pays étrangers mais disponible sur internet). En face, la demande des consommateurs est de plus en plus forte. En effet, l'émergence d'internet met à disposition du consommateur une quantité massive d'informations sur la diététique du sportif pouvant lui donner l'impression d'avoir les compétences suffisantes pour se dispenser des conseils d'un professionnel.

Ces événements dans le marché des préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait sont un terrain propice au développement de mésusages et de dérives sciemment acceptées par certains consommateurs les plus expérimentés de substances dopantes. Selon une étude menée en France, en Allemagne et en Italie, chez les étudiants sportifs, la consommation de compléments alimentaires augmente le risque d'usage de substances dopantes d'un facteur 4,9. La consommation de compléments alimentaires peut être la première étape avant l'usage sciemment consenti de substances dopantes [69]. Dans une autre étude portant sur une cohorte de 2997 triathlètes, une forte corrélation est démontrée entre la consommation de compléments alimentaires dans un premier temps puis de substances dopantes [70].

La réglementation européenne permet un contrôle et une régulation des produits vendus légalement en France, mais les réseaux sociaux et internet sont des nouveaux canaux de distribution ou l'information et la conformité des produits ne sont pas toujours garanties. La labellisation AFNOR norme NF V 94-001 est un indicateur qui peut orienter le consommateur : le pharmacien doit sélectionner préférentiellement ces produits.

Le pharmacien en tant que professionnel de santé de proximité a un rôle important. Il doit avoir connaissance des effets indésirables liés à la consommation de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait, comme nous avons pu le voir plus haut, ces produits ne sont pas dénués de risques, d'autant plus s'il y a un mésusage. Lorsqu'un consommateur potentiel se présentera, il sera important d'évaluer, comme nous l'avons vu avec un questionnaire, les besoins énergétiques afin d'orienter ou non le sportif sur un aliment diététique de l'effort et de rappeler les précautions d'emploi. Il ne devra en aucun cas se

substituer à l'alimentation de base variée et équilibrée. Un discours de prévention sur les conduites dopantes peut-être amené dans la discussion, notamment chez les sportifs de haut niveau et les pratiquants de musculation.

Ce travail ouvre le débat sur les conditions de vente de préparations en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait par l'intermédiaire de site internet ou le consommateur ne recevra ni conseils personnalisés, ni précautions d'emploi et l'évaluation des risques sanitaires liée à la distribution, d'un coté dans le circuit internet, de l'autre dans le circuit des revendeurs spécialisés. La prévention et l'apprentissage en amont des sportifs sur leurs besoins nutritionnels pourraient être une solution pour limiter les mésusages.

Annexe 1 :

Tableau résumé des études de la méta-analyse :

Auteur/Année	Suppléments utilisés				Contrôle	
	Composition	Quantité	Durée	N	Quantité	N
Andersen 2005	W, C, E	25 g	1 à 2 fois/j	11	25 g CHO	11
Antonio 2014	Régime HP	4,4 g/kg/j	Inconnue	20	1,8 g/kg/j	10
Antonio 2015	Régime HP	3,4 g/kg/j	Inconnue	31	2,3 g/kg/j	17
Arazi 2011	W	1,8 g/kg/	2 à 3 fois/j	20	CHO	20
Arnason 2013	W	20 g + 20 g CHO	1 fois /j	75	40 g CHO	66
Babault 2015 (Whey)	W	25 g	2 fois /j	54	74,25 g/j CHO	54
Babault 2015 (Casein)	C	10 g + 20 g CHO	2 fois /j	22	30 g CHO	24
Bemben 2010	W	35 g	1 fois /j	11	CHO	10
Brown 2004	W	11 g	3 fois/j	9	Inconnue	9
Bunout 2004	Régime HP	6,5 g	2 fois/j	31	Inconnue	28
Burke 2001	W	1,2 g/kg/j	4 fois/j	12	1,2g/kg/j CHO	11
Campbell 1995	Régime HP	1 g/kg/j	Inconnue	6	Inconnue	6
Candow 2006	W	1,2 g/kg/j	3 fois/j	9	1,2 g/kg/j CHO	9
Carter 2005	W	35 g	1 fois/j	11	CHO	10
Coburn 2006	W, Leucine	20 g + 6,2 g	1 à 2 fois/j	11	26,2 g CHO	12
Cribb 2007	W	1,29 g/kg/j	3 fois/j	5	1,325 g/kg/j CHO	7
Daly 2014	Régime HP	45 g/j	2 fois /j	48	25 à 35 g CHO	43
Deibert 2011	Soja	13,35 g + 7,65 g CHO	1 fois/j	15	Inconnue	15
Eliot 2008	W	35 g	1 fois/j	11	CHO	10
Erksine 2012	W	20 g	2 fois/j	17	6,8 g CHO	16
Farup 2014	W	19,5 g + 19,5 g CHO	2 fois/j	11	39 g CHO	11
Hartman 2007	Lait	17,5 g + 25,7 g CHO	1 fois/j	18	CHO	19
Herda 2013	W	20 g	1 à 2 fois/j	22	27 g CHO	21
Hoffman 2007	W, E, Glutamine	42 g + 18 g CHO	1 à 2 fois/j	11	63 g CHO	10
Hoffman 2009	W, C	42 g + 2 g CHO	2 fois/j	13	Inconnue	7
Hulmi 2009	W	15 g	2 fois/j	11	CHO	10
Hulmi 2015	W	30 g	1 fois/j	22	34,5 g CHO	21
Iglay 2009	Régime HP	1,6 g/kg/j	Inconnue	18	0,8 g/kg/j CHO	18

Josse 2010	Lait	18 g + 24 g CHO	1 fois/j	10	CHO	10
Kerksick 2006	W, C	48 g	1 fois/j	10	48 g CHO	11
Leenders 2013	Lait	15 g	1 fois/j	15	7,13 g CHO	14
Mielke 2009	W, Leucine	20 g + 6,2 g leucine	2 fois/j	13	20 g CHO	13
Mitchell 2015	Lait	14 g + 54 g CHO	1 fois/j	Inc.	CHO	Inc
Negro 2014	Régime HP	20 g	1 fois/j	12	Inconnue	14
Oesen 2015	W	20,7 g + 9,3 g CHO	1 à 2 fois/j	25	Inconnue	31
Olsen 2006	Lait	20 g + 80 g CHO	2 fois/j	8	80 g CHO	8
Paoli 2015	W	1,8 g/kg/j	2 fois/j	9	0,85 g/kg/j CHO	9
Paoli 2016	W	1,8 g/kg/j	2 fois/j	9	0,85 g/kg/j CHO	9
Rankin 2004	Lait	0,21 g/kg/j	1 fois/j	10	1,25 g/kg/j CHO	9
Reidy 2016	W	22 g	1 fois/j	23	22 g CHO	23
Rozenek 2002	Régime HP	106 g	2 fois/j	26	CHO	25
Snijders 2015	C	27,5 g + 15 g CHO	1 fois/j	20	CHO	19
Verdijk 2009	C	10 g	2 fois/j	13	CHO	13
Volek 2013	W	21,6 g + 22,5g CHO	1 fois/j	19	45,2 g CHO	22
Weisgarber 2012	W	0,3 g/kg/j	2 fois/j	9	CHO	8
White 2009	W	5 g + 20 g CHO	1 fois/j	12	25 g CHO	11
Willoughby 2007	W, C	40 g	1 à 2 fois/j	10	40 g CHO	9

Légende : - W : Lactosérum

- C : Caséines
- HP : Hyper-protéiné
- CHO : Carbohydrates

Annexe 2 : Vitamines et substances minérales pouvant être ajoutées aux denrées alimentaires

1. Vitamines

Vitamine A

Vitamine D

Vitamine E

Vitamine K

Vitamine B1

Vitamine B2

Niacine

Acide pantothénique

Vitamine B6

Acide folique

Vitamine B12

Biotine

Vitamine C

2. Substances minérales

Calcium

Magnésium

Fer

Cuivre

Iode

Zinc

Manganèse

Sodium

Potassium

Sélénium

Chrome

Molybdène

Fluorure

Chlorure

Phosphore

Bore

Annexe 3 : Formules vitaminiques et substances minérales pouvant être ajoutées aux denrées alimentaires

1. Formules vitaminiques

VITAMINE A

Rétinol/Acétate de rétinyle/Palmitate de rétinyle/Bêta-carotène

VITAMINE D

Cholécalciférol/Ergocalciférol

VITAMINE E

D-alpha-tocophérol/DL-alpha-tocophérol/Acétate de D-alpha-tocophéryle/Acétate de DL-alpha-tocophéryle/Succinate acide de D-alpha-tocophéryle

VITAMINE K

Phylloquinone (phytoménadione)/Ménaquinone

VITAMINE B1

Chlorhydrate de thiamine/Mononitrate de thiamine

VITAMINE B2

Riboflavine/Riboflavine 5'-phosphate (sodium)

NIACINE

Acide nicotinique/Nicotinamide

ACIDE PANTOTHÉNIQUE

D-pantothénate de calcium/D-pantothénate de sodium/Dexpanthénol

VITAMINE B6

Chlorhydrate de pyridoxine/Pyridoxine 5'-phosphate/Dipalmitate de pyridoxine

ACIDE FOLIQUE

Acide ptéroylmonoglutamique/L-méthylfolate de calcium

VITAMINE B12

Cyanocobalamine/Hydroxocobalamine

BIOTINE

D-biotine

VITAMINE C

Acide L-ascorbique/L-ascorbate de sodium/L-ascorbate de calcium/L-ascorbate de potassium/
6-palmitate de L-ascorbyl.

2. Substances minérales

Ca :

Carbonate de calcium/Chlorure de calcium/Malate de citrate de calcium/Sels calciques de l'acide citrique/Gluconate de calcium/Glycérophosphate de calcium/Lactate de calcium/Sels calciques de l'acide orthophosphorique/Hydroxyde de calcium/Malate de calcium/Oxyde de calcium/Sulfate de calcium/Oligosaccharides phosphorylés de calcium

Mg :

Acétate de magnésium/Carbonate de magnésium/Chlorure de magnésium/Sels de magnésium de l'acide citrique/Gluconate de magnésium/Glycérophosphate de magnésium/Sels de magnésium de l'acide orthophosphorique/Lactate de magnésium/Hydroxyde de magnésium Oxyde de magnésium/Citrate de potassium-magnésium/Sulfate de magnésium

Fe :

Bisglycinate ferreux / Carbonate ferreux / Citrate ferreux / Citrate d'ammonium ferrique
Gluconate ferreux / Fumarate ferreux / Diphosphate de sodium ferrique / Lactate ferreux / Sulfate ferreux / Phosphate d'ammonium ferreux / Sel de sodium de l'édétate de fer (III) / Diphosphate ferrique (pyrophosphate ferrique) / Saccharate ferrique / Fer élémentaire (somme du fer carbonyle, du fer électrolytique et du fer réduit à l'hydrogène)

Cu :

Carbonate de cuivre/Citrate de cuivre/Gluconate de cuivre/Sulfate de cuivre/Complexe cuivre-lysine

I :

Iodure de sodium/Iodate de sodium/Iodure de potassium/Iodate de potassium

Zn :

Acétate de zinc/Bisglycinate de zinc/Chlorure de zinc/Citrate de zinc/Gluconate de zinc Lactate de zinc/Oxyde de zinc/Carbonate de zinc/Sulfate de zinc

Mn :

Carbonate de manganèse/Chlorure de manganèse/Citrate de manganèse/Gluconate de manganèse/Glycérophosphate de manganèse/Sulfate de manganèse

Na :

Bicarbonate de sodium/Carbonate de sodium/Citrate de sodium/Gluconate de sodium/Lactate de sodium/Hydroxyde de sodium/Sels sodiques de l'acide orthophosphorique

Se :

Levure enrichie en sélénium/Sélénate de sodium/Hydrogénosélénite de sodium/Sélénite de sodium

F :

Fluorure de sodium/Fluorure de potassium

K :

Bicarbonate de potassium/Carbonate de potassium/Chlorure de potassium/Citrate de potassium/Gluconate de potassium/Glycérophosphate de potassium/Lactate de potassium Hydroxyde de potassium/Sels potassiques de l'acide orthophosphorique

Cr :

Chlorure de chrome (III) et sa forme hexahydratée/Sulfate de chrome (III) et sa forme hexahydratée/Picolinate de chrome/Lactate de chrome (III) trihydraté

Mb :

Molybdate d'ammonium [molybdène (VI)]/Molybdate de sodium [molybdène (VI)]

Br :

Acide borique/Borate de sodium

Annexe 4 :

Substances dont l'utilisation dans les aliments fait l'objet d'une interdiction, de restrictions ou est sous contrôle communautaire.

Substances interdites

Herbes d'éphédra et préparations en contenant, extraites d'espèces d'Ephedra

Substances sous contrôle communautaire

Écorce de yohimbe et préparations en contenant, extraites de yohimbe [Pausinystalia yohimbe (K. Schum.) Pierre ex Beille

Annexe 5 :

Questionnaire d'orientation des sportifs à l'officine dans le cadre d'une supplémentation en aliments diététiques de l'effort préparés en poudre pour boisson riche en protéines issues du lait				
Activité				
Type de sport	Force	Mixte	Endurance	
Objectif	Prise de masse		Maintien	
Niveau	Loisir		Compétition	
Nombres d'entraînements par semaine et durée (Convertir en METS)	https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/home			
Travail	Bureau	Mixte	Manuel	
Nombres d'heures de travail par semaine (Convertir en METS)	https://sites.google.com/site/compendiumofphysicalactivities/home			
Régime alimentaire				
Nombre de repas journaliers	1	2	3	4
Repas équilibré*	Oui		Non	
Junk food** par semaine	0	1	2	3 et +
Age (an)				
Poids (kg)				
Taille (m)				
Estimation des dépenses énergétiques journalières (kcal)	MB + Activité physique journalière			
Besoins protéiques journaliers (g/j)	$\frac{(\text{Dépenses énergétiques journalières} \times 0,15 (15\% \text{ AET}))}{4} =$ Quantité de protéines totales par jour (g/j). Conversion en g/kg/j : Besoins protéiques journaliers/poids (kg)			

Par mesure de précaution, lors du calcul des besoins protéiques journaliers. Il faudra choisir 15 % des AET pour les besoins protéiques sans dépasser 2 g/kg/j pour les sportifs de force en période de prise de masse, 1,5 g/kg/j pour les sportifs de force en maintien de masse musculaire et 1,4 g/kg/j pour les sportifs d'endurance.

Formules utiles :

Homme : MB (kcal) = 259 x((Poids kg)^{0,48} x (Taille m)^{0,50} x (Age an)^{-0,13}).

Femme : MB (kcal) = 230 x((Poids kg)^{0,48} x (Taille m)^{0,50} x (Age an)^{-0,13}).

1 MET = 1 kcal/kg/h qui correspond à la consommation de 3,5 ml d'O₂/kg/min.

Activité physique hebdomadaire :

(Somme des coûts énergétiques des activités sportives (en METS) x durée de chaque activité (h)) + (Coût énergétique du travail (en METS) x durée (h)) + (Activités en dehors du travail et du sport (METS) x durée (h))

Conversion en kcal : 1 MET pour un homme de 70 kg = 70 kcal/h

Activité physique journalière :

(Activité physique hebdomadaire (kcal))/7

Dépenses énergétiques journalière :

(MB en kcal/h x temps de sommeil (h) par jour) + Activité physique journalière (kcal)

Calcul des besoins protéiques journaliers :

(Dépenses énergétiques journalières x 0,15 (15% AET))/4 = Quantité de protéines totales par jour (g/j).

Conversion en g/kg/j : Besoins protéiques journaliers/poids (kg)

Bibliographie :

- [1]. « 5,46 millions de Français sont inscrits dans une salle de fitness ». Journal L'Equipe du 20/04/2017.
- [2]. Whey Protein Products Market: Industry Perspective, Comprehensive Analysis and Forecast, 2015 – 2021 Zion Market Research.
- [3]. Protein and energy interactions throughout life. Metabolic basis and nutritional implications. Young VR. 1991.
- [4]. Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations, Rapport AFSSA, 2007.
- [5]. Effect of initial muscle glycogen levels on protein catabolism during exercise. Lemon PW, Mullin JP. 1980.
- [6]. Free radicals and tissue damage produced by exercise. Davies KJ. 1982.
- [7]. Activité physique – Contextes et effets sur la santé. INSERM. 2008.
- [8]. Actualisation des repères du PNNS : Révision des repères de consommations alimentaires. ANSES. Décembre 2016.
- [9]. Actualisation des repères du PNNS : Elaboration des références nutritionnelles. Décembre 2016.
- [10]. Diet, muscle glycogen, and endurance performance. J Appl Physiol. 1971. [J Karlsson](#), B. Saltin.
- [11]. Muscle triglyceride and glycogen in endurance exercise : implications for performance. Sports Med. 2004. N A Johnson. Stephen R Stannard.
- [12]. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. Am. J. Physiol. 1993;265:E380-91. Romijn JA, Coyle EF, Sidossis LS, et al.
- [13]. Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise : the crossover concept. J. Appl. Physiol. 1994;76:2253-61. Brooks GA, Mercier J.
- [14]. Nutrition et performance en sport. [La science au bout de la fourchette. Thème 3. Les besoins en protéines des athlètes : discussion et recommandations pratiques. Hausswirth. Ed INSEP. 2012.](#)
- [15]. Effect of creatine on aerobic and anaerobic metabolism in skeletal muscle in swimmers. Br. J. Sports med. 1996. Soop M, Björkman O, Ceberlad G, et al.

- [16]. Effect of creatine and weight training on muscle creatine and performance in vegetarians. *Med Sci Sports Exerc*. Nov 2003. Darren G Burke.
- [17]. Effect of creatine and weight training on muscle creatine and performance in vegetarians. Mahoney D., Tamopolsky M. 2003. *Med Sci Sports Exerc* .
- [18]. L'évaluation des risques présentés par la créatine pour le consommateur – Véracité des allégations relatives à la performance sportive ou à l'augmentation de la masse musculaire. 23/01/2001. ANSES.
- [19]. Nutrition du sportif. 3^e édition. Chapîtres 10. X. Bigard. Charlers-Yannick Guezennec. 2017.
- [20]. Les compléments alimentaires destinés aux sportifs. Rapport d'expertise collective. ANSES. 11/2016.
- [21]. Effect of oral glutamine on whole body carbohydrate storage during recovery from exhaustive exercise. Bowtell JL, Gelly K, Jackman ML, Patel A, Simeoni M et Rennie MJ. *J. Appl. Physiol*. 1999;86.
- [22]. Evaluation des risques liés à la consommation de boissons dites «énergisantes ». ANSES. Avis du 09/2013.
- [23]. Boissons énergisantes. ANSES. 2017.
- [24]. Myoglobin: an essential hemoprotein in striated muscle », *Journal of Experimental Biology*, vol. 207. Septembre 2004. George A. Ordway et Daniel J. Garry.
- [25]. Propriétés des fibres musculaires squelettiques. *Reproduction Nutrition Développement*. F. Bacou, P. Vigneron. 1988.
- [26]. Protein requirements for endurance athletes. *Nutrition*. Tarnopolsky M. 2004.
- [27]. Energy and macronutrient requirements for physical fitness in exercising subjects. Genton L. 2010.
- [28]. Nutrition et performance en sport. La science au bout de la fourchette. Thème 11 : L'équilibre alimentaire. Eve Tiollier, Christophe Hauswirth, et al. 2012.
- [29]. François Luquet (coord.), Lait et produits laitiers : vache, brebis, chèvre, t. 2, Lavoisier, Tec & Doc, 1990, 637 p, « Produits dérivés des fabrications fromagères (par Sottiez).
- [30]. Emerging Health Properties of Whey Proteins and Their Clinical Implications. *J Am Coll Nutr*. Krissansen GW. 2007.

- [31]. https://biochim-agro.univ-lille.fr/proteines/co/000_Module_Proteines_18.html.
- [32]. Casein sub-micelles: do they exist ? Pieter Walstra. 1999. International Dairy Journal [Volume 9, Issues 3–6](#), March 1999, Pages 189-192.
- [33]. Biochimie agro-industrielle valorisation alimentaire de la production agricole. Linden et Lorient. 1994.
- [34]. Membranes polymères en milieu aqueux. Procédés membranaires : état de l'art et perspectives. Pourcelly. 2004.
- [35]. Stratégie de modélisation et d'optimisation des performances de l'ultrafiltration pour le fractionnement d'hydrolysats protéiques. Bodin A. 2016.
- [36]. Science et technologie des aliments : Principes de chimie des constituants et de technologie des procédés, PPUR, 2010. Raphaël Badoud, Jürg Löliger et Alain Etournaud.
- [37]. Protéines laitières. Edition T1. 2010. Snappe J, Lepoudere A.
- [38]. Excessive workout supplement use: an emerging eating disorder in men, American Psychological Association. Achiro R. 2015 Annual Convention.
- [39]. Medication use by athletes at the Athens 2004 Summer Olympic Games. Clin J Sport Med. 2009. C. Tsitsimpikou et al.
- [40]. Protein supplements consumption: a comparative study between the city centre and the suburbs of Palermo, Italy. Antonio Bianco. 2013.
- [41]. 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. Robert W Morton. et al. 03-2018.
- [42]. Incidence of acne vulgaris in young adult users of protein-calorie supplements in the city of João Pessoa. T. Carvalho Pontes, G. Costa Fernandes Filho. 2013.
- [43]. Effect of a Protein Supplement on the Gut Microbiota of Endurance Athletes: A Randomized, Controlled, Double-Blind Pilot Study. D. Moreno -Perez. 2018.
- [44]. Dietary protein intake and the progressive nature of kidney disease: the role of hemodynamically mediated glomerular injury in the pathogenesis of progressive glomerular sclerosis in aging, renal ablation, and intrinsic renal disease. Brenner BM. 1982.
- [45]. Dietary protein intake and renal function. W. F. Martin. 2005.
- [46]. Tuttle KR, Puhlman ME, Cooney SK, Short RA: Effects of amino acids and glucagon on

renal hemodynamics in type 1 diabetes. *Am J Physiol Renal Physiol*. 2002.

[47]. Bilo HJ, Schaap GH, Blaak E, Gans RO, Oe PL, Donker AJ: Effects of chronic and acute protein administration on renal function in patients with chronic renal insufficiency. *Nephron*. 1989.

[48]. Hammond KA, Janes DN: The effects of increased protein intake on kidney size and function. *J Exp Biol*. 1998.

[49]. Skov AR, Toubro S, Bulow J, Krabbe K, Parving HH, Astrup A: Changes in renal function during weight loss induced by high vs low-protein low-fat diets in overweight subjects. *Int J Obes Relat Metab Disord*. 1999.

[50]. Slomowitz LA, Gabbai FB, Khang S, Satriano J, Thareau S, Deng A, Thomson SC, Blantz RC, Munger KA: Protein intake regulates the vasodilatory function of the kidney and the NMDA receptor expression. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. 2004.

[51]. Report: Protein Drinks Have Unhealthy Metals Consumer Reports Study Finds Worrisome Levels of Lead, Cadmium, and Other Metals. [Kathleen Doheny](#) from www.webmd.com. 2010.

[52]. www.ameli.fr/assure/sante/themes/allergie-alimentaire

[53]. Allergie aux protéines de lait de vache, *La revue du praticien médecine générale*. Anne Moneret-Vautrin 2013.

[54]. Ezri J et coll. Recommandations pour la prise en charge du nourrisson avec allergie aux protéines de lait de vache. *Paediatrica* 2016 ; 27 (4) : 20-24.

[55]. www.ameli.fr/assure/sante/themes/intolerance-lactose/definition-symptomes

[56]. Food-Drug Interactions. R. Bushra. 2011.

[57]. Dietary protein is beneficial to bone health under conditions of adequate calcium intake: an update on clinical research. Kelsey M. Mangano. Shivani Sahni. 2014.

[58]. Dietary acid load is associated with lower bone mineral density in men with low intake of dietary calcium. *J Bone Miner Res*. K M Magngano. 2013.

[59]. Les compléments alimentaires. ANSES. 11/2019.

[60]. Règlement (CE) n° 1925/2006 du Parlement européen et du Conseil du 20 décembre 2006 concernant l'adjonction de vitamines, de minéraux et de certaines autres substances aux denrées alimentaires, JO L 404 du 30.12.2006, p. 26.

- [61]. Directive 2002/46/CE du Parlement européen et du Conseil du 10 juin 2002 relative au rapprochement des législations des États membres concernant les compléments alimentaires, JO L 183 du 12.7.2002, p. 51.
- [62]. Règlement (CE) n° 2015/2283 du Parlement européen et du Conseil du 25 novembre 2015 relatif aux nouveaux aliments, JO L 327 du 11.12.2015, p. 1.
- [63]. www.ordre.pharmacien.fr
- [64]. Nutrition et performance en sport. La science au bout de la fourchette. Thème 18. Le gain de masse musculaire. Hausswirth. Ed INSEP. 2012.
- [65]. Nutrition et performance en sport. La science au bout de la fourchette. Thème 16. Le jeune sportif. Hausswirth. Ed INSEP. 2012.
- [66]. Compendium of Physical Activities: an Update of Activity Codes and MET Intensities. Ainsworth B., et al. Med Sci Sports Exerc. 09/2000.
- [67]. Analysis of non-hormonal nutritional supplements for anabolic-androgenic steroids results of an international study. H. Geyer, K. Koehler, et al. Int. J. Sports Med. 2004.
- [68]. Evolving consumer trends for whey protein sports supplements: the Heckman ordered probit estimation. C. Keogh. C Li. 2019.
- [69]. Doping use among tertiary education students in six developed countries. F. Papadopoulous, I. Skalkidis, J. Parkkari, E. Petridou. « Sports Injuries ». European Union Group. Eur. J. Epidemiol. 2006;21:307-13.
- [70]. Associations between physical and cognitive doping. A cross-sectional study in 2997 triathletes. P. Dietz, R. Ulrich, R. Dalaker, et al. PloS ONE. 2013.
- [71]. Les références nutritionnelles en vitamines et minéraux. Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective. Mars 2021.
- [72]. Endurance exercise training attenuates leucine oxidation and BCOAD activation during exercise in humans. Mackenzie S, Phillips SM, et al. Am J Physiol Endocrinol Metab. 2000.
- [73]. [EU Register on nutrition and health claims](#), EFSA, 04/2017.
- [74]. Glutamine as an Anti-Fatigue Amino Acid in Sports Nutrition. Coqueiro A.Y, Rogero M., Tirapegui J. Nutrients 04/2019.
- [75]. Devenir des lipides au cours de la clarification du lactosérum. C Théodet, G Gandemer. Le Lait, INRA Editions, 1994.

- [76]. Les structures supramoléculaires du lait : structure et impact nutritionnel de la micelle de caséine et du globule gras. J. Léonil. M.-C. Michalski. P. Martin. INRA Prod Anim. 2013.
- [77]. Role of bone in regulation of systemic acid-base balance. Green J. Kleeman R. *Kidney Int.* 1991.
- [78]. Alimentation et équilibre acido-basique. Demigné C. Davicco M-J. Coxam V. Unité de nutrition humaine, INRA. 2013.
- [79]. Inadequate protein intake and osteoporosis : possible involvement of the IGF-1 system. In “Challenges of modern medicine. P. Burckhardt & R. P. Heaney. *Nutritional Aspects of Osteoporosis* 1994.
- [80]. Ingested protein dose response of muscle and albumin protein synthesis after resistance exercise in young men. Moore DR. Robinson MJ. Et al. *Am. J. Clin. Nutr.* 2009.
- [81]. Postexercise nutrient intake timing in humans is critical to recovery of leg glucose and protein homeostasis. Levenhagen DK. Gresham JD. Et al. *Am. J. Physiol.* 2001.
- [82] Postexercice net protein synthesis in human muscle from orally administered amino acids. Tipton KD. Ferrando AA. Et al. *J. Appl. Physiol.* 1992.
- [83]. Longitudinal changes in body composition in older men and women: role of body weight change and physical activity. Hughes VA et al. *Am J Clin Nutr.* 2002 Aug.
- [84]. Sarcopenia: European consensus on definition and diagnosis. Report of the European Working Group on Sarcopenia in Older People. *Age Ageing.* Cruz-Jentoft AJ et al. 2010 Jul.
- [85]. Physiopathological mechanism of sarcopenia. Boirie Y. *Nutr Health Aging.* 2009 oct.
- [86]. Biochimie des activités physiques. Poortmans R., Boisseau N. Ed. Broché, 480p., p. 354. 2012.
- [87]. Anatomie et physiologie humaines. Marieb E. Katja H. Ed. Pearson Education France. 2014.
- [88] : Endurance exercise training attenuates leucine oxidation and BCOAD activation during exercise in humans. MacKenzie S., Phillips SM, Carter SL. *J. Physiol. Endocrinol. Metab.* 2000.
- [89] : Branched-chain amino acids in health and disease: Metabolism, alterations in blood plasma, and as supplements. Milan Holecek. *Nutrition and Metabolism.* 05/2018.
- [90] : Nutrition du sportif. Bigard. X. Guezennec C.Y. 2017. Edition : Elsevier Masson.
- [91] : Physiological and pathological roles of branched-chain amino acids in the regulation of protein and energy metabolism and neurological functions. Shimomura Y, Kitaura Y.

Pharmacol Res. 07/2018.

[92] : Stimulation of muscle ammonia production during exercise following branched-chain amino acid supplementation in humans. J. Physiol. 1996.

[93] : ATP and phosphocreatine changes in single human muscle fibers after intense electrical stimulation. Söderlund K., Hultman E. Am. J. Physiol. 1991.

[94] : Reference Values of Maximal Oxygen Uptake for Polish Rowers. Klusiewicz A. Starczewski M., et al. J of Human Kinetics. 4/2014. 121-127.

[95] : Excretion of Urea in Sweat at Rest, During Exercise After Carbohydrate Loading (CHO Loaded) and Carbohydrate Depletion (CHO Depleted).. Data from Lemon and Mullin 1980.

[96] : Consommations alimentaires et apports nutritionnels dans la restauration hors foyer en France. Février 2021. ANSES.

[97] : Physiologie Humaine, Paris, de Boeck, Lauralee Sherwood, Juin 2015.

Title : Sports food based on milk proteins and the pharmacist advice.

Abstract:

Adequate protein intake is important for the proper functioning of the body, maintenance and muscle development in athletes. Consumption of dietetic foods for effort based on milk proteins is more and more widespread among athletes of all levels with the intention to achieve more quickly the expected effects: muscle mass gain and increase in athletic performance. Nevertheless, their consumption is not devoid of undesirable effects. The desired effects can be overestimated by the athlete and the border between good use and misuse can be narrow. These products are discussed in this thesis, as well as the role of the pharmacist who, through the advice associated with their dispensation, ensures health monitoring of their use in athletes.

Keywords :

Dietetic foods for effort – Whey protein powder – Nutritional requirements – Official advice.

TITRE : Aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait et le conseil officinal.

RESUME :

Un apport approprié en protéines est important pour le bon fonctionnement de l'organisme, le maintien et le développement musculaire chez le sportif. La consommation d'aliments diététiques de l'effort à base de protéines de lait est de plus en plus répandue chez les sportifs de tous niveaux dans le but d'arriver plus rapidement aux effets recherchés : prise de masse musculaire et augmentation de la performance sportive. Néanmoins, la consommation de ces aliments n'est pas dénuée d'effets indésirables. Les effets recherchés peuvent être surévalués par le sportif, et, la frontière entre le bon usage et le mésusage peut être étroite. Ces produits sont discutés dans cette thèse, ainsi que le rôle du pharmacien, qui par le conseil associé à leur dispensation, assure une veille sanitaire sur leur utilisation chez le sportif.

DISCIPLINE administrative : Pharmacie, Filière officine, Nutrition.

MOTS-CLES : Aliments diététiques de l'effort - Nutrition - Besoins nutritionnels du sportif - Réglementation des denrées alimentaires destinées aux sportifs – Protéines de lactosérum en poudre – Conseil officinal.

Titre et résumé en Anglais : voir au recto de la dernière page de la thèse

INTITULE ET ADRESSE DE L'UFR OU DU LABORATOIRE : Service de physiologie et physiopathologies humaines, Faculté des sciences pharmaceutiques de Toulouse, 35 chemin des maraichers, 31062 Toulouse cedex 09.

Directeur de thèse : Dr Cendrine CABOU