Université de Lille Faculté de Pharmacie de Lille

Année Universitaire 2019 / 2020

THESE

POUR LE DIPLOME D'ETAT

DE DOCTEUR EN PHARMACIE

Soutenue publiquement le 15 octobre 2020

Par Mr CREUPELANDT Thibault

Compléments alimentaires, produits pour sportifs et bases de la nutrition chez le culturiste

---

Membres du jury :

Président : GERVOIS Philippe, Professeur de biochimie, Faculté de Pharmacie de Lille

Assesseur : BORDAGE Simon, Maitre de Conférences, Faculté de Pharmacie de Lille

Membre extérieur : BOEYAERT Timothée, Docteur en Pharmacie, Pharmacie RAJAN

Faculté de Pharmacie

de Lille

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX

☎ 03.20.96.40.40 - 🖷 : 03.20.96.43.64

http://pharmacie.univ-lille2.fr

Université de Lille

Président :	Jean-Christophe CAMART
Premier Vice-président :	Damien CUNY
Vice-présidente Formation :	Lynne FRANJIÉ
Vice-président Recherche :	Lionel MONTAGNE
Vice-président Relations Internationales :	François-Olivier SEYS
Directeur Général des Services :	Pierre-Marie ROBERT
Directrice Générale des Services Adjointe :	Marie-Dominique SAVINA

Faculté de Pharmacie

Doyen :	Bertrand DÉCAUDIN
Vice-Doyen et Assesseur à la Recherche :	Patricia MELNYK
Assesseur aux Relations Internationales :	Philippe CHAVATTE
Assesseur à la Vie de la Faculté et aux Relations avec le Monde Professionnel :	Thomas MORGENROTH
Assesseur à la Pédagogie :	Benjamin BERTIN
Assesseur à la Scolarité :	Christophe BOCHU
Responsable des Services :	Cyrille PORTA

Liste des Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	ALLORGE	Delphine	Toxicologie
M.	BROUSSEAU	Thierry	Biochimie
M.	DÉCAUDIN	Bertrand	Pharmacie Galénique
M.	DEPREUX	Patrick	ICPAL
M.	DINE	Thierry	Pharmacie clinique
Mme	DUPONT-PRADO	Annabelle	Hématologie
M.	GRESSIER	Bernard	Pharmacologie
M.	LUYCKX	Michel	Pharmacie clinique
M.	ODOU	Pascal	Pharmacie Galénique
M.	STAELS	Bart	Biologie Cellulaire

Liste des Professeurs des Universités

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	ALIOUAT	El Moukhtar	Parasitologie
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Physique
M.	BERTHELOT	Pascal	Onco et Neurochimie
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie – Pharmacie clinique
M.	CHAVATTE	Philippe	ICPAL
M.	COURTECUISSE	Régis	Sciences végétales et fongiques
M.	CUNY	Damien	Sciences végétales et fongiques
Mme	DELBAERE	Stéphanie	Physique
M.	DEPREZ	Benoît	Lab. de Médicaments et Molécules
Mme	DEPREZ	Rebecca	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	DUPONT	Frédéric	Sciences végétales et fongiques
M.	DURIEZ	Patrick	Physiologie
M.	FOLIGNE	Benoît	Bactériologie
M.	GARÇON	Guillaume	Toxicologie
Mme	GAYOT	Anne	Pharmacotechnie Industrielle
M.	GOOSSENS	Jean François	Chimie Analytique
M.	HENNEBELLE	Thierry	Pharmacognosie

M.	LEMDANI	Mohamed	Biomathématiques
Mme	LESTAVEL	Sophie	Biologie Cellulaire
M.	LUC	Gerald	Physiologie
Mme	MELNYK	Patricia	Onco et Neurochimie
M.	MILLET	Régis	ICPAL
Mme	MUHR – TAILLEUX	Anne	Biochimie
Mme	PAUMELLE-LESTRELIN	Réjane	Biologie Cellulaire
Mme	PERROY	Anne Catherine	Législation
Mme	ROMOND	Marie Bénédicte	Bactériologie
Mme	SAHPAZ	Sevser	Pharmacognosie
M.	SERGHERAERT	Eric	Législation
Mme	SIEPMANN	Florence	Pharmacotechnie Industrielle
M.	SIEPMANN	Juergen	Pharmacotechnie Industrielle
M.	WILLAND	Nicolas	Lab. de Médicaments et Molécules

Liste des Maîtres de Conférences - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	BALDUYCK	Malika	Biochimie
Mme	GARAT	Anne	Toxicologie
Mme	GOFFARD	Anne	Bactériologie
M.	LANNOY	Damien	Pharmacie Galénique
Mme	ODOU	Marie Françoise	Bactériologie
M.	SIMON	Nicolas	Pharmacie Galénique

Liste des Maîtres de Conférences

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	ALIOUAT	Cécile Marie	Parasitologie
M.	ANTHERIEU	Sébastien	Toxicologie
Mme	AUMERCIER	Pierrette	Biochimie
Mme	BANTUBUNGI	Kadiombo	Biologie cellulaire
Mme	BARTHELEMY	Christine	Pharmacie Galénique
Mme	BEHRA	Josette	Bactériologie
M	BELARBI	Karim	Pharmacologie
M.	BERTHET	Jérôme	Physique
M.	BERTIN	Benjamin	Immunologie
M.	BLANCHEMAIN	Nicolas	Pharmacotechnie industrielle
M.	BOCHU	Christophe	Physique
M.	BORDAGE	Simon	Pharmacognosie
M.	BOSC	Damien	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	BRIAND	Olivier	Biochimie
M.	CARNOY	Christophe	Immunologie
Mme	CARON	Sandrine	Biologie cellulaire
Mme	CHABÉ	Magali	Parasitologie
Mme	CHARTON	Julie	Lab. de Médicaments et Molécules
M	CHEVALIER	Dany	Toxicologie
M.	COCHELARD	Dominique	Biomathématiques
Mme	DANEL	Cécile	Chimie Analytique
Mme	DEMANCHE	Christine	Parasitologie
Mme	DEMARQUILLY	Catherine	Biomathématiques
M.	DHIFLI	Wajdi	Biomathématiques
Mme	DUMONT	Julie	Biologie cellulaire
Mme	DUTOUT-AGOURIDAS	Laurence	Onco et Neurochimie
M.	EL BAKALI	Jamal	Onco et Neurochimie
M.	FARCE	Amaury	ICPAL
Mme	FLIPO	Marion	Lab. de Médicaments et Molécules
Mme	FOULON	Catherine	Chimie Analytique
M.	FURMAN	Christophe	ICPAL
Mme	GENAY	Stéphanie	Pharmacie Galénique
M.	GERVOIS	Philippe	Biochimie

Mme	GOOSSENS	Laurence	ICPAL
Mme	GRAVE	Béatrice	Toxicologie
Mme	GROSS	Barbara	Biochimie
M.	HAMONIER	Julien	Biomathématiques
Mme	HAMOUDI	Chérifa Mounira	Pharmacotechnie industrielle
Mme	HANNOTHIAUX	Marie-Hélène	Toxicologie
Mme	HELLEBOID	Audrey	Physiologie
M.	HERMANN	Emmanuel	Immunologie
M.	KAMBIA	Kpakpaga Nicolas	Pharmacologie
M.	KARROUT	Youness	Pharmacotechnie Industrielle
Mme	LALLOYER	Fanny	Biochimie
M.	LEBEGUE	Nicolas	Onco et Neurochimie
Mme	LECOEUR	Marie	Chimie Analytique
Mme	LEHMANN	Hélène	Législation
Mme	LELEU-CHAVAIN	Natascha	ICPAL
Mme	LIPKA	Emmanuelle	Chimie Analytique
Mme	MARTIN	Françoise	Physiologie
M.	MOREAU	Pierre Arthur	Sciences végétales et fongiques
M.	MORGENROTH	Thomas	Législation
Mme	MUSCHERT	Susanne	Pharmacotechnie industrielle
Mme	NIKASINOVIC	Lydia	Toxicologie
Mme	PINÇON	Claire	Biomathématiques
M.	PIVA	Frank	Biochimie
Mme	PLATEL	Anne	Toxicologie
M.	POURCET	Benoît	Biochimie
M.	RAVAUX	Pierre	Biomathématiques
Mme	RAVEZ	Séverine	Onco et Neurochimie
Mme	RIVIERE	Céline	Pharmacognosie
Mme	ROGER	Nadine	Immunologie
M.	ROUMY	Vincent	Pharmacognosie
Mme	SEBTI	Yasmine	Biochimie
Mme	SINGER	Elisabeth	Bactériologie
Mme	STANDAERT	Annie	Parasitologie
M.	TAGZIRT	Madjid	Hématologie
M.	VILLEMAGNE	Baptiste	Lab. de Médicaments et Molécules
M.	WELTI	Stéphane	Sciences végétales et fongiques

M.	YOUS	Saïd	Onco et Neurochimie
M.	ZITOUNI	Djamel	Biomathématiques

Professeurs Certifiés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	HUGES	Dominique	Anglais
Mlle	FAUQUANT	Soline	Anglais
M.	OSTYN	Gaël	Anglais

Professeur Associé - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	DAO PHAN	Hai Pascal	Lab. Médicaments et Molécules
M.	DHANANI	Alban	Droit et Economie Pharmaceutique

Maîtres de Conférences ASSOCIES - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	BRICOTEAU	Didier	Biomathématiques
Mme	CUCCHI	Malgorzata	Biomathématiques
M.	FRIMAT	Bruno	Pharmacie Clinique
M.	GILLOT	François	Droit et Economie pharmaceutique
M.	MASCAUT	Daniel	Pharmacie Clinique
M.	ZANETTI	Sébastien	Biomathématiques
M.	BRICOTEAU	Didier	Biomathématiques

AHU

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	DEMARET	Julie	Immunologie
Mme	HENRY	Héloïse	Biopharmacie
Mme	MASSE	Morgane	Biopharmacie

Faculté des Sciences Pharmaceutiques

et Biologiques de Lille

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX

Tel. : 03.20.96.40.40 - Télécopie : 03.20.96.43.64

http://pharmacie.univ-lille2.fr

L'Université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont propres à leurs auteurs.

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Maître de conférences Philippe GERVOIS, pour l'honneur que vous me faites en acceptant la direction et la présidence de cette thèse. Je vous remercie pour vos conseils, votre gentillesse et de m'avoir orienté et rassuré quant au déroulement de cette thèse dans une période sanitaire si particulière.

A Monsieur Simon BORDAGE, maître de conférences, je vous remercie d'avoir accepté de faire partie de mon jury et d'évaluer cette thèse.

A Monsieur Timothée BOEYAERT, docteur en pharmacie, je te remercie d'avoir accepté le fait d'être membre du jury. Je sais que ce sujet t'intéresse et c'est un honneur de te compter parmi ces membres.

A ma bien aimée, **Marine**, 9 ans et 10 mois de relation, 6 ans de fiançailles, 2 ans de mariage, tant de chiffres mais si peu de mots pour t'exprimer tout mon amour et ma gratitude. Je te dois énormément, de par ce que tu as fait de moi et de par ton soutien inébranlable après toutes ces années malgré de nombreuses périodes d'examens compliquées. Cette thèse aura été, pour toi et moi, une réelle épreuve mais tu as toujours été là pour positiver, me remonter le moral et m'encourager. Tu es l'amour de ma vie et tu m'as offert la plus belle chose dont je pouvais rêver, notre fils. Nous formons une si belle famille. Je t'aime mon amour.

A mon fils, **Gabriel**, tu es mon rayon de soleil, un sourire sur ton visage et tous les tracas sont oubliés. Je ferais tout pour être le meilleur père qu'un fils puisse souhaiter et j'espère te transmettre des valeurs qui t'aideront à t'élever et à évoluer de jour en jour. Je ferais tout ce qui est en mon pouvoir pour que tu puisses réaliser tes rêves, aussi fous qu'ils soient. Tu es un petit être plein de vie et je te remercie pour tout ce que tu nous apportes. Je t'aime mon fils.

A mes parents, je tenais tout d'abord à m'excuser quant au stress vécu durant ces années d'études, je savais (et vous aussi) que tout allait bien se passer ! Merci infiniment pour toutes les valeurs que vous m'avez inculquées, de l'éducation que vous m'avez offerte, de votre confiance et de votre amour. Cette fois-ci, c'est (vraiment) la fin des études et voyez en cette thèse l'aboutissement de vos efforts.

A mes sœurs, je tenais à vous remercier pour tous les précieux conseils apportés, que ce soit pour cette thèse ou dans la vie en générale. Merci de me montrer l'exemple et de prendre de mes nouvelles, là où je fais bien souvent défaut et je m'en excuse profondément. Merci pour tous ces bons moments passés ensemble, en famille.

A Natalia, Michaël, Lucas et Zachary, je vous remercie pour votre soutien indéfectible et vos encouragements. Véritable famille, parrain, tia et tontons de mon fils, vous êtes des frères et sœurs spirituels, véritable guide dans nos vies, toujours de bons conseils, toujours de bonne humeur et toujours bienveillants. Merci infiniment pour cette magnifique amitié que l'on a pu construire au fur-et-à-mesure des années et du lien très fort qui peut nous unir.

A ma belle-famille, je vous remercie également pour votre soutien, votre confiance et votre gentillesse, cela me fait chaud au cœur. Vous êtes des grands-parents, marraine et tonton formidables pour Gabriel. Merci pour tous ces bons moments passés ensemble autour de bons repas et de longues soirées animés.

A **Théo**, cousin par alliance, coach sportif émérite et culturiste accompli, merci pour ton aide concernant cette thèse. Tu es une vraie source de motivation. Continue à être ambitieux, cela portera ses fruits.

A mes amis, de la faculté et autres, merci pour ces agréables moments passés sur les bancs de la faculté et ailleurs.

A tous ce que j'oublie et dont j'ai croisé le chemin.

Je tenais également à avoir une pensée pour mon défunt **grand-père**, **Léon**, culturiste de son temps, époque où les moyens de transmission des connaissances étaient limités mais qui n'avait absolument rien à envier aux culturistes d'aujourd'hui. Tout ceci est également en partie grâce à lui, il m'a initié et a allumé la flamme, celui à qui je dois cette passion pour le sport et cette envie de dépassement de soi qui m'accompagne tous les jours. Merci infiniment pour tout ce que tu as fait pour moi, on ne se rend compte qu'en grandissant de tout ce qui a pu nous être transmis, consciemment ou inconsciemment, plus jeune. Merci pour tout papy, repose en paix.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES ABREVIATIONS 21

INTRODUCTION 23

PARTIE I : GENERALITES SUR LES COMPLEMENTS ALIMENTAIRES 25

I. INTRODUCTION 25

II. DEFINITION 25

A. Juridique 25

B. Commune 26

III. REGLEMENTATION 27

A. Introduction 27

B. Texte fondateur européen : Directive 2002/46/CE 28

C. Transposition en droit français : Décret n°2006-352 28

D. Instances compétentes en matière de consommation et de sécurité 29

1. Direction Générale de la Concurrence, Consommation et de le Répression des Fraudes (DGCCRF) 29
2. L'European Food Safety Autorithy (EFSA) 30
3. L'Agence Nationale de la Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) 30

IV. CIRCUIT SECURISE DE LA CONCEPTION A LA POST COMMERCIALISATION DES COMPLEMENTS ALIMENTAIRES DESTINES AUX SPORTIFS 31

A. Sécurité au niveau des ingrédients incorporés et la formulation des compléments alimentaires 31

B. Sécurité dans le circuit de fabrication des compléments alimentaires 32

1. Fondement du circuit fabrication 32
2. Bonnes pratiques de fabrication applicables aux compléments alimentaires 33
3. L'analyse HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point) 34
4. Le contrôle qualité 35
5. Assurance qualité 35

C. Etiquetage 36

1. Mentions spécifiques aux compléments alimentaires 36
2. Norme AFNOR NF V 94-001 destinée à la lutte anti-dopage 38

D. Commercialisation 39

1. Déclaration de mise sur le marché 39
2. Distribution des compléments alimentaires 40

E. Sécurité concernant la post-commercialisation 40

V. ALLEGATION NUTRITIONNELLE ET DE SANTE (ANS) 41

A. Définition 41

B. Réglementation 41

C. En France 42

VI. CIRCUIT DE DISTRIBUTION 42

A. Au niveau mondial 42

B. A l'échelle européenne et française ... 43
C. De nombreux réseaux de distribution ... 44

PARTIE II : LE CULTURISME ... 45

I. GENERALITES ... 45
A. Définition ... 45
B. Fédérations et catégories ... 46
II. HISTORIQUE ... 47
A. Histoire du culturisme ... 48
1. La Grèce antique ... 48
2. En France ... 48
3. En Europe ... 49
4. Amérique du Nord ... 49
B. Histoire de l'utilisation des compléments alimentaires dans le culturisme ... 50
1. Retour en Grèce Antique ... 50
2. Idées naissantes du XIXe siècle ... 50
1. Naissance de sources de protéines en poudre ... 51
2. Découvertes chimiques ... 52
3. Le XXe siècle et ses nombreuses découvertes biochimiques ... 53
4. L'utilisation de compléments alimentaires des années 1930 jusqu'à aujourd'hui ... 54
1. Des années 1930 aux années 1980 ... 54
2. Des années 1980 à aujourd'hui ... 55

PARTIE III : PRESENTATION DE DIFFERENTS PRODUITS POUR SPORTIFS DESTINES A LA PRISE DE MASSE MUSCULAIRE, A L'AUGMENTATION DES PERFORMANCES PHYSIQUES ET A LA PERTE DE MASSE GRASSE RENCONTRES SUR LE MARCHE ... 57

I. LES PRODUITS POUR SPORTIFS DESTINES A LA PRISE DE MASSE MUSCULAIRE ET MAINTIEN DE LA MASSE SECHE ... 57
A. Présentation de différentes sources de protéines retrouvées en tant que suppléments en poudre ... 57
1. Les protéines laitières ... 58
1. Introduction ... 58
2. Le lactosérum ... 59
a. Différentes formes de protéines de lactosérum ... 59
b. Le lactosérum : source de peptides bioactifs ... 60
3. La Caséine ... 62
2. Les œufs ... 63
3. Le bœuf ... 64
4. Protéines végétales ... 64
1. Soja ... 64
2. Autres : Riz, chanvre, pois ... 65
5. Procédés de fabrication des diverses sources de protéines en poudre ... 66
1. Procédés de filtration ... 66

a. Méthode d'échange d'ions ... 66
b. Microfiltration et ultrafiltration à flux croisé ... 66
2. Hydrolyse de protéines par voie enzymatique ... 67
3. Adjonction d'enzymes digestives ... 68
B. Les BCAA (Branched-Chain Amino Acid) ou acides aminés à chaines ramifiés ou acides aminés branchés ... 69
1. Introduction ... 69
2. Métabolisme ... 70
3. Absorption et lien avec la fatigue centrale ... 71
4. Action sur la synthèse des protéines musculaires ... 72
5. Action sur l'absorption intracellulaire du glucose ... 73
C. L'hydroxyméthylbutyrate (HMB) : un des métabolites de la leucine ... 74
1. Métabolisme de la leucine ... 75
2. Mécanisme d'action et propriétés du HMB ... 75
D. La glutamine ... 76
4. LES PRODUITS POUR SPORTIFS DESTINES A AUGMENTER LES PERFORMANCES PHYSIQUES ... 77
A. Les précurseurs d'oxyde nitrique (NO) ... 77
1. La L-arginine ... 78
2. La citrulline ... 79
1. La L-citrulline ... 79
2. Malate de citrulline ... 80
3. L-citrulline associée au glutathion ... 81
3. La bêta-alanine et carnosine ... 81
B. La créatine ... 82
1. Sources ... 82
2. Pharmacologie ... 83
1. Biosynthèse ... 83
2. Absorption ... 84
3. Cinétique ... 84
3. Mécanismes d'action ... 84
1. Sur la puissance ... 84
2. Sur l'hypertrophie musculaire ... 85
4. Différentes formulations sur le marché ... 85
1. La créatine monohydrate ... 85
2. Créatine kré-alkalyn ... 86
3. Créatine ester-éthylique ... 86
4. Autres formes ... 86
C. Les glucides ... 87
1. Maltodextrine ... 88
2. D-ribose ... 89
3. Palatinose ... 89
5. LES PRODUITS POUR SPORTIFS DESTINES A LA PERTE DE MASSE GRASSE ... 91
A. Produits à base de caféine ... 91

B. La L-carnitine ... 91
1. Sources ... 91
2. Pharmacologie ... 91
3. Différentes formulations et variantes ... 92
4. Indications ... 93
1. Sur la masse grasse ... 93
2. Sur la récupération ... 93
3. Sur les performances ... 94
C. Le CLA (Conjugated Lineoleic Acid) ... 94
1. Introduction ... 94
2. Sources et fabrication ... 95
3. Mécanisme d'action ... 95
1. Sur la diminution de la graisse corporelle ... 95
2. Sur la perte de poids ... 96
6. LES VITAMINES, OMEGA-3 ET ANTIOXYDANTS ... 97
A. Les complexes multivitamines ... 97
B. Les lipides insaturés ... 97
C. Les antioxydants ... 98
7. CAS DES BOOSTERS DE TESTOSTERONE ... 99
A. Le tribulus terrestris ... 99
B. Le ZMA (Zinc Magnésium Vitamine B6) ... 99

PARTIE IV : PERTINENCE D'UTILISATION, EFFICACITE ET CONSEILS LIES AUX DIFFERENTS COMPLEMENTS ALIMENTAIRES ET PRODUITS POUR CULTURISTES, EFFETS INDESIRABLES, PHARMACOVIGILANCE ET DIETETIQUE ... 101

I. INTRODUCTION ... 101
A. Pertinence des études scientifiques et difficulté de réalisation ... 101
B. Notions élémentaires diététiques et bases du résultat en culturisme ... 102
8. COMPLEMENTS ALIMENTAIRES ET PRODUITS POUR SPORTIFS ... 104
A. Les protéines ... 104
1. Recommandations ... 105
2. Sécurité en matière de consommation de protéines ... 106
1. Impact rénal et hépatique ... 106
2. Impact osseux ... 106
3. Impact sur le pH corporel ... 107
4. Impact cardiovasculaire ... 108
3. Prise des protéines en poudre ... 108
4. Choix du supplément ... 109
5. Situation particulière ... 111
B. Les BCAA ... 113
1. Effets recherchés ... 113

2. Prise 114
C. Leucine et HMB 115
D. La glutamine 117
E. L'arginine 118
F. La citrulline 119
G. Bêta-alanine et carnosine 120
H. Les suppléments « pre-workout » 121
I. La créatine 122
J. Les compléments glucidiques 123
K. La L-carnitine et dérivés 125
L. Le CLA 126
9. PHARMACOVIGILANCE 126
A. Nutrivigilance 126
1. Recommandations globales de l'ANSES sur la consommation de ces compléments alimentaires 128
2. Recommandations globales du ministère des sports sur la consommation de ces compléments alimentaires et norme AFNOR NF V 94-001 128
B. Effets indésirables caractéristiques de certains compléments alimentaires 129
1. Compléments hypoglycémiants 129
2. Compléments « pre-workout » 130
10. ASPECT DIETETIQUE CHEZ LE CULTURISTE ET RECOMMANDATIONS 130
A. Période de prise de masse musculaire 130
1. Balance énergétique et excédent calorique 130
2. Lipides 132
3. Glucides 132
4. Tableau récapitulatif des calories en période de prise de masse musculaire 133
B. Période de perte de masse grasse et de maintien de la masse musculaire dite de sèche 134
1. Balance énergétique et déficit calorique 134
2. Lipides 135
1. Recommandations générales sur les apports en lipides 135
2. Un point sur le régime cétogène 136
3. Glucides 136
4. Tableau récapitulatif des calories en période de sèche 137
CONCLUSION 139
BIBLIOGRAPHIE 141

TABLE DES ABREVIATIONS

AAE : Acide aminé essentiel

ADN : Acide désoxyribonucléique

ADP : Adénosine diphosphate

ALCAR : Acétyl-L-carnitine

ARN : Acide ribonucléique

AFLD : Association française de lutte contre le dopage

AFNOR : Association française de normalisation

AGAT : Arginine glycine aminotransférase

AMA : Association mondiale anti-dopage

ANS : Allégation nutritionnelle de santé

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

ATP : Adénosine triphosphate

ATPGD1 : ATP-grasp-protéin 1

BCAA : Branched-chain amino acid

BCAT : BCAA transaminase

BCKDH : Branched-chain α-kéto dehydrogenase

BHE : Barrière hémato-encéphalique

BPF : Bonnes pratiques de fabrication

BSA : Albumine de sérum bovin

CCK : Cholécystokinine

CLA : Conjugated linoleic acid

DEJ : Dépense énergétique journalière

DGGCRF : Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

DHA : Acide docohexaénoïque

DLC : Date limite de consommation

ER : Récepteurs aux oestrogènes

EFSA : European food safety authority

EPA : Acide éicosapentaénoïque

FADH : Flavine adénine dinucléotide réduit

FDA : Food and drug administration

GAMT : Guanidoacétate aminotransférase

GMP : Good manufacturing practices

GMPs : Glycomacropeptides

GPLC : Glycopropinoyl-L-carnitine

HACCP : Hazard analysis critical control point

HMB : Hydroxyméthylbutyrate

IAAO : Indice d'oxydation des acides aminés

IFBB : International federation of bodybuilding and fitness

IG : Index glycémique

IGF1 : Insulin-like growth factor 1

IRBMS : Institut de recherche du bien-être, de la médecine et du sport santé

KIC : Acide α-cétoisocaproïque

LCLT : L-carnitine-L-tartrate

LPL : Lipoprotéine lipase

mTOR : Mammalian target of rapamycin

mTORC : MTOR complex

NADH : Nicotinamide adénine dinuclétoide réduit

NO : Monoxyde d'azote

PDCAAS : Protein digestibility-connected amino acid score

PI3k : Phosphatidyl Inositol 3-kinase

PKC : Protéine kinase C

PPAR : Peroxisome proliferator-activated receptor

SDCA : Syndicat de la diététique et des compléments alimentaires

SNFS : Société française de la nutrition spécialisée

SYNADIET : Syndicat professionnel des fabricants de produits naturels, diététiques et compléments alimentaires

UCP : Protéine découplante du tissu adipeux brun

UE : Union européenne

ZMA : Zinc, Magnésium et Vitamine B6

INTRODUCTION

Aujourd'hui, les compléments alimentaires sportifs sont en plein essor. Ceci est certainement dû à un « effet de mode », largement relayé par les réseaux sociaux, prônant un mode de vie « sain », comprenant une alimentation rigoureuse et une pratique sportive quotidienne. Dans le cadre de cette thèse, nous allons nous limiter aux culturistes, qu'ils soient amateurs ou professionnels, ayant des objectifs visant à évoluer vers un physique plus athlétique et atteindre des performances physiques personnels et/ou compétitifs.

L'utilisation de compléments alimentaires sportifs ne s'adresse donc pas à tous(tes) les pratiquants(es) d'activités sportives bien qu'ils soient adaptés à la majeure partie de la population adulte. Le but est de mettre toutes les chances de son côté pour atteindre ses propres objectifs et les compléments alimentaires sportifs ont des rôles bien précis dans cet accomplissement personnel. C'est ainsi que les compléments alimentaires sportifs prennent une place plus ou moins indispensable en fonction du niveau du pratiquant de musculation et des objectifs à atteindre.

Chez les culturistes, il existe deux types de périodes avec des objectifs différents : la période de la prise de masse musculaire où le but est de synthétiser un maximum de nouvelles fibres musculaires, et ainsi faire croître les muscles, et une période dite de « sèche » où le but est de perdre un maximum de masse grasse tout en essayant de conserver sa masse musculaire intacte. Entre ces deux périodes, diffèrent l'alimentation, les séances d'entrainement et la complémentation.

Au vu de la quantité croissante des compléments alimentaires sportifs, il n'est pas aisé pour le consommateur débutant de s'y retrouver, force est de constater que très peu s'intéressent aux différents mécanismes d'action, aux bénéfices et aux risques : ils semblent les avoir plébiscités, soit par croyance, soit par ignorance. De plus, ces compléments sont disponibles sur de nombreux circuits de distribution (enseignes commerciales (supermarché, magasin de sport, magasin spécialisé, etc.), sur internet et en pharmacie d'officine) dont le circuit de distribution majoritaire est internet, plateforme sans interaction avec une personne qualifiée et aguerrie.

On constate ainsi que les compléments alimentaires sportifs font partis d'un phénomène de société mais qui ont des rôles actifs dans l'organisme. Méconnus du

grand public et qualifiés à tort, par certains, de produits dopants, nous allons voir et expliquer les différents rôles des compléments alimentaires dans l'organisme, leur but, leur utilisation grâce à l'étude des principaux composés actifs de ces compléments et discuter de la place du pharmacien face au marché du complément alimentaire sportif qui reste néanmoins un produit de santé possédant une action dans l'organisme, qu'elle soit bénéfique à dose recommandée et parfois inutile ou néfaste à fortes doses.

PARTIE I : GENERALITES SUR LES COMPLEMENTS ALIMENTAIRES

I. Introduction

Actuellement, les produits pour sportifs peuvent être classés en 2 catégories :

- En tant que complément alimentaire régis par la directive 2002/46/CE.
- En tant qu'aliment enrichi régis par le règlement 1925/2006 du Parlement européen et du Conseil.

Cette dernière catégorie concerne l'adjonction de vitamines, de minéraux et de certaines autres substances (oligo-élements, acides aminés, acides gras essentiels, fibres, diverses plantes et extraits végétaux) aux denrées alimentaires. De ces denrées en résulte une ingestion de quantités dépassant considérablement celles qui sont raisonnablement susceptibles d'être ingérées dans des conditions normales de consommation dans le cadre d'un régime alimentaire équilibré et varié.

II. Définition

A. Juridique

Il existe une définition juridique des compléments alimentaires provenant du décret du 20 mars 2006 qui entend par (1) :

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

Cette définition donne des précisions sur certains termes employés :

- « Nutriments » assimilés à « vitamines et minéraux »

- « Substances à but nutritionnel et physiologique » sont des « substances chimiquement définies possédant des propriétés nutritionnelles ou physiologiques, à l'exception des nutriments définis plus haut et des substances possédant des propriétés exclusivement pharmacologiques. »

Une autre précision est donnée sur les « plantes et préparations de plantes » fréquemment utilisées dans les compléments alimentaires dont « les ingrédients composés de végétaux ou isolés à partir de ceux-ci, à l'exception des substances mentionnées plus haut, possédant des propriétés nutritionnelles ou physiologiques, à l'exclusion des plantes ou des préparations de plantes possédant des propriétés pharmacologiques et destinées à un usage exclusivement thérapeutique. »

B. Commune

Les compléments alimentaires sont des denrées alimentaires dont le but est de compléter le régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique seuls ou combinés. (2)

La DGCCRF (Direction Générale de la Concurrence, Consommation et Répression des Fraudes) définit le complément alimentaire en 3 caractéristiques :

- Leur objectif : Ces produits complètent le régime alimentaire. Ils ne viennent donc pas se substituer aux aliments courants. Leurs apports nutritionnels s'ajoutent aux apports issus de l'alimentation courante, y compris ceux provenant des aliments enrichis.
- Leur composition : ces produits sont essentiellement constitués d'ingrédients ayant un effet nutritionnel ou physiologique (plantes, nutriments, autres substances…). A la différence des aliments classiques, les compléments alimentaires ne sont pas constitués d'une matrice alimentaire c'est-à-dire d'une structure physique complexe associant notamment des macronutriments (glucides, lipides, protéines).
- Leur présentation : ces produits sont vendus sous la forme de dose, ce qui implique de définir une unité de prise. Cette unité de prise doit être mesurable et de faible quantité, comparativement aux quantités d'aliments consommées habituellement. (3)

La dénomination de vente de ces produits est « complément alimentaire » et aucune ambiguïté ne doit exister quant à la nature du produit que le consommateur achète. Présenté dans la directive européenne de 2002, un complément alimentaire doit donc être dépourvu de substances thérapeutiques ou pharmacologiques actives. Ce qui pose donc la limite entre un complément alimentaire utilisé dans un cadre sportif et une substance dite 'dopante' permettant de meilleures performances sportives grâce à des substances actives.
Les compléments alimentaires sont donc des aliments présentés sous forme pré-dosée. Ils ne doivent pas être confondus avec d'autres denrées alimentaires pour ne pas induire le consommateur en erreur concernant la nature et la qualité du produit.

III. Réglementation

A. Introduction

Les compléments alimentaires sont strictement encadrés puisque ce sont des denrées alimentaires donc soumis aux obligations générales du droit alimentaire et aux règles qui en découlent. Ils sont, à la fois, encadrés au niveau français mais également au niveau communautaire, par trois étages cumulés de réglementation :

- Textes régissant les matières premières agricoles
- Textes relatifs aux denrées alimentaires : obligation de sécurité (hygiène des denrées alimentaires, additifs, arômes, nouveaux ingrédients, matériaux au contact des aliments, contaminants dont résidus de produits phytosanitaires) et obligation d'information (étiquetage, présentation, publicité, allégations nutritionnelles et de santé, contrôle métrologique des préemballages, définition éventuelle des recettes).
- Textes spécifiques aux compléments alimentaires : définitions, sécurité de composition, garanties d'usage, étiquetage.

B. Texte fondateur européen : Directive 2002/46/CE

Depuis 2002, les compléments alimentaires sont soumis à la directive 2002/46/CE du Parlement européen et du Conseil du 10 juin 2002 relative au rapprochement des législations des Etats membres concernant les compléments alimentaires, qui leur confère un véritable statut. Cette directive est également appelée « directive cadre des compléments alimentaires ».

Elle définit de façon réglementaire les compléments alimentaires en 5 points :

- Ce sont des denrées alimentaires
- Leur but est de compléter un régime alimentaire normal
- Ils constituent une source concentrée de nutriments ou autres substances
- Ils ont un effet nutritionnel ou physiologiques seuls ou combinés
- Ils sont commercialisés sous forme de doses, à savoir les présentations telles que les gélules, les pastilles, les comprimés, les pilules et autres formes similaires, ainsi que les sachets en poudre, les ampoules de liquide, les flacons munis d'un compte-gouttes et les autres formes analogues de préparations liquides ou en poudre destinées à être prises en unités mesurées de faibles quantités.

Cette définition permet aux compléments alimentaires d'obtenir un cadre et également de distinguer deux groupes parmi les substances à effet nutritionnel ou physiologique pouvant être utilisé dans les compléments alimentaires : les « nutriments » et « les autres substances « à effet nutritionnel ou physiologique.

Enfin, elle donne une indication sur l'étiquetage des compléments alimentaires et sur leur mise sur le marché au sein de l'Union Européenne.

C. Transposition en droit français : Décret n°2006-352

La directive européenne concernant la législation des compléments alimentaires a été transposé en droit français par le Décret n°2006-352 du 20 mars 2006 (modifié par le Décret du 20 mars 2011).

A ce jour, il existe des arrêtés qui ont été pris sur la base du décret :

- Arrêté du 9 mai 2006 modifié relatif aux nutriments pouvant être employés dans la fabrication des compléments alimentaires.

- Arrêté du 14 juin 2006 modifié relatif aux modalités de transmission des déclarations de première mise sur le marché
- Arrêté du 24 juin 2014 établissant la liste des plantes, autres que les champignons, autorisées dans les compléments alimentaires et les conditions de leur emploi. Version consolidée le 3 octobre 2016.

Ce décret prévoit une notification à la DGCCRF des compléments alimentaires préalablement à leur mise sur le marché, un étiquetage spécifique, des listes positives de plantes et d'autres substances utilisables dans les compléments alimentaires (certains n'ont pas encore été publiés à l'heure actuelle) ainsi que les doses journalières maximales pour les nutriments. (4)

D. Instances compétentes en matière de consommation et de sécurité

1. Direction Générale de la Concurrence, Consommation et de le Répression des Fraudes (DGCCRF)

Dépendant du code de la consommation, les compléments alimentaires font l'objet d'une déclaration préalable à leur commercialisation auprès de la DGCCRF. Ceci est directement imputable au Décret 2006-352 du 20 mars 2006, articles 15 et 16.
Cette déclaration poursuit deux objectifs : Mieux connaître le marché en vue notamment de facilité les contrôles et mettre à jour des listes positives de plantes et de substances. Ainsi, les substances vitaminiques et minérales pouvant être utilisées dans la fabrication de compléments alimentaires sont listées par l'arrêté du 9 mai 2006. Les autres substances pouvant être incorporées dans les compléments alimentaires ne doivent pas faire l'objet d'une interdiction par la DGCCRF.

Depuis le 26 avril 2006, une déclaration est obligatoire avant commercialisation et se fait via « Téléicare », un téléservice dédié, qui permet de transmettre directement une déclaration de mise sur le marché de complément alimentaire en mode dématérialisée. Il existe également un autre moyen, lors d'une difficulté impondérable qui interdit le recours au service ou lorsque le téléservice n'est pas accessible, c'est

de l'envoyer en mode dit dégradé. Cette déclaration se fait par le biais d'un formulaire CERFA n°15265*01. Puis, l'envoi du formulaire se fait alors par voie postale. (5)

2. L'European Food Safety Autorithy (EFSA)

L'EFSA est une agence européenne fondée par l'Union européenne, financée par elle-même, qui opère indépendamment de la Commission européenne, du Parlement européen et des Etats membres de l'Union Européenne.
Cette agence est au cœur de la sécurité européenne des aliments, à la base de l'évaluation des risques relatifs à la sécurité des aliments destinés à l'Homme et à l'animal en Europe. En étroite collaboration avec les autorités nationales et en consultation ouverte avec les parties prenantes, l'EFSA fournit des avis scientifiques indépendants qui étayent les politiques et législations européennes en matière de chaîne alimentaire ainsi qu'une communication claire sur les risques existants et émergents.
Elle joue un rôle important dans la collecte et l'analyse des données scientifiques nécessaires afin de garantir que l'évaluation des risques en Europe repose sur les informations les plus exhaustives possibles.

L'EFSA est chargée de vérifier le bien-fondé scientifique des demandes d'allégations introduites, certaines déjà utilisées actuellement ou d'autres étant proposées par des demandeurs d'autorisation, c'est-à-dire des compagnies qui souhaitent soumettre des allégations au processus d'autorisation de l'UE. Ces informations sont ensuite utilisées comme fondement scientifique par la Commission européenne et les Etats membres pour décider s'ils autorisent ou non l'utilisation de ces allégations. (6)

3. L'Agence Nationale de la Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES)

L'ANSES a un rôle important d'évaluation des risques liés à la consommation de compléments alimentaires. En effet, elle documente les dangers auxquels les consommateurs sont susceptibles d'être exposés, elle détermine les modalités et les

niveaux de cette exposition, elle évalue le risque correspondant et émet des recommandations.

Les produits pour sportifs sont surveillés par cette agence nationale. En juillet 2009, suite à l'instauration de la loi Hôpital, Patients, Santé, Territoire (HPST), un dispositif en matière de sécurité sanitaire est lancé : le dispositif de nutrivigilance, confié à l'ANSES. Ce dispositif fait suite à l'étude individuelle nationale des consommateurs alimentaire version 2, plus communément appelée étude INCA 2. Ce type d'étude a permis de recueillir des informations détaillées sur la consommation alimentaire des français et plus particulièrement concernant les compléments alimentaires.

IV. Circuit sécurisé de la conception à la post commercialisation des compléments alimentaires destinés aux sportifs

A. Sécurité au niveau des ingrédients incorporés et la formulation des compléments alimentaires

On entend par ingrédient toute substance, y compris les additifs et les enzymes, utilisée dans la fabrication ou la préparation d'une denrée alimentaire et encore présente dans le produit fini, éventuellement sous forme modifiée. Lorsqu'un ingrédient d'une denrée alimentaire a été élaboré à partir de plusieurs ingrédients, ces derniers sont considérés comme ingrédients de cette denrée (décret n°2011-949 datant du 11 août 2011).

Pour les compléments alimentaires, les ingrédients regroupent d'une part, les substances à effet nutritionnel ou physiologique (Directive n°2002/46/CE) et d'autres part, les additifs, les arômes et les auxiliaires technologiques.

On entend par « additif » toute substance habituellement non consommée comme aliment en soi et habituellement non utilisée comme ingrédient caractéristique dans l'alimentation, possédant ou non une valeur nutritive et dont l'adjonction intentionnelle aux denrées alimentaires dans un but technologique au stade de leur fabrication, transformation, préparation, traitement, conditionnement a pour effet

qu'elle devient elle-même directement ou indirectement un composant de ces denrées alimentaires, selon le décret n°89-674 du 18 septembre 1989.

On entend par « arôme » tout produit ou substance qui, étant destiné à être ajouté à des denrées alimentaires pour leur donner une odeur, un goût ou une odeur et un goût, entre dans l'une des catégories prévues, à l'exception des substances ayant exclusivement un goût sucré, acide ou salé, selon l'article 2 du décret n°91-366 du 11 avril 1991.

On entend par « auxiliaire technologique » toute substance non consommée comme ingrédient alimentaire en soi, volontairement utilisée dans la transformation de matières premières, de denrées alimentaires ou de leurs ingrédients pour répondre à un objectif technologique pendant le traitement ou la transformation et pouvant avoir pour résultat la présence non intentionnelle mais techniquement inévitable de résidus de cette substance ou de ses dérivés dans le produit fini, à condition que ces résidus n'aient pas d'effet technologique sur le produit fini (décret n°2011-509 du 10 mai 2011). On a par exemple :

- Les solvants d'extraction, autorisés par la directive n°88/244
- Les résidus pesticides dont les limites sont fixées par le règlement n°396/2005
- Les contaminants dont les limites sont fixées par le règlement n°1881/2006

B. Sécurité dans le circuit de fabrication des compléments alimentaires

1. Fondement du circuit fabrication

La fabrication des compléments alimentaires est strictement encadrée en France et en Europe. En effet, ce circuit doit répondre à de nombreuses normes qualité et réglementations diverses. Le but est d'assurer la traçabilité des compléments alimentaires ainsi que de garantir l'hygiène et la sécurité de ces produits mis sur le marché.

Dès sa conception, le développement d'un complément alimentaire intègre les exigences qualité et de sécurité qui conditionnent la pérennité du produit. Concernant les normes qualité, elles reposent sur :

- Les bonnes pratiques de fabrication (BPF) ou « Good Manufacturing Practices » (GMP) conformément au règlement 852/2004/CE, notamment son annexe II relative aux dispositions générales d'hygiène pour tous les exploitants du secteur alimentaire.
- La méthode HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point) consistant en une analyse exhaustive des dangers, de leur gravité et de leur fréquence d'apparition associés à chaque étape de la conception des produits jusqu'à leur délivrance.
- Le contrôle qualité appliqué à la fois aux articles de conditionnement, aux ingrédients et aux produits finis.
- L'assurance qualité : audits et revues de direction, gestion des produits non conformes, gestion de la documentation, identification du produit, traçabilité en amont et en aval, formation et qualification du personnel, métrologie et gestion des réclamations.

La traçabilité est prévue jusqu'au point de vente grâce à des procédures ad hoc mise en place conjointement par les responsables de la mise sur le marché et les acteurs du circuit de distribution.

L'article 18 du règlement CE n°178/2002 impose aux exploitants du secteur alimentaire d'identifier, d'une part, leurs fournisseurs d'ingrédients, d'articles de conditionnement et, de manière générale, de toute substance destinée à être incorporée ou susceptible d'être incorporée dans une denrée alimentaire et, d'autre part, leurs clients, entreprises auxquelles ils fournissent leurs produits finis. Ces exigences permettent d'identifier l'ensemble des acteurs intervenant dans la chaîne de mise sur le marché.

2. Bonnes pratiques de fabrication applicables aux compléments alimentaires

Les BPF applicables aux compléments alimentaires proviennent d'une charte qualité rédigée par le Syndicat de la Diététique et des Compléments alimentaires (SDCA) et le Syndicat Professionnel des Fabricants de Produits Naturels, Diététiques et Compléments Alimentaires (SYNADIET) émettant des recommandations issues de la mise en œuvre du règlement 852/2004/CE.

Elles s'adressent aux exploitants du secteur alimentaire sur les règles générales d'hygiène applicables à toutes les denrées alimentaires.

Ce sont des mesures de maîtrise qui permettent d'assurer une approche globale efficace sur le plan de l'analyse des dangers, de la maîtrise des risques et du contrôle de la qualité des produits, entre autres, par le biais de normes et de pratiques appropriées aux spécifications du produit, à la fabrication, à l'entreposage, à la manipulation et à la distribution du produit.

Cette charte de qualité n'a pas de statut légal mais offre une aide aux industriels pour répondre aux normes de sécurité européennes et présenter un dossier solide à la DGCCRF afin d'éviter tout risque de refus de commercialisation.

3. L'analyse HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point)

Méthode rendue obligatoire par le règlement 852/2004/CE sur l'hygiène des denrées alimentaires, elle consiste en une analyse exhaustive des dangers, de leur gravité et de leur fréquence d'apparition associés à chaque étape de la conception des produits jusqu'à leur livraison. Cette analyse permet ainsi d'adopter des mesures de maîtrise appropriées et préventives et définit des mesures de maîtrise critiques à mettre en place, incluant les méthodes de surveillance de ces mesures critiques, pour garantir la sécurité et la qualité des produits.

L'objectif de l'analyse HACCP est d'amener les professionnels à maîtriser efficacement les dangers susceptibles d'affecter la santé du consommateur. Elle aide à mettre en place une gestion et une surveillance efficaces des dangers évalués comme inacceptables en termes d'impact sur la santé du consommateur. Une étude

HACCP doit être appliquée dès les premiers stades du processus de développement du produit afin de minimiser les risques potentiels et de les éliminer.

Pour information, dans cette analyse, plusieurs types de dangers sont évoqués : les dangers biologiques (micro-organismes, mycotoxines, etc.), les dangers chimiques (additifs et auxiliaires technologiques au-delà des quantités maximales, allergènes, composés néoformés, etc.) et les dangers physiques (corps étranger présent par exemple). Tous les dangers ne sont pas à mettre au même niveau car ne présentent pas le même risque pour la santé du consommateur et n'ont pas le même effet néfaste sur celui-ci.

4. Le contrôle qualité

Il s'applique à la fois :

Aux articles de conditionnement qui doivent se conformer aux exigences réglementaires du règlement n°1935/2004/CE et du décret n°92-631 du 8 juillet 1992 à ses spécifications. Le packaging final doit porter les informations nécessaires et les mentions spécifiques dans la forme et à l'endroit requis. Une personne habilitée doit s'assurer que les emballages correspondent bien à la règlementation.

Aux ingrédients dont le contrôle des critères de pureté permet de garantir la conformité aux ingrédients aux spécifications requises. Ils sont adaptés à la nature des ingrédients, à leurs fonctions et cas d'emploi. Ils sont effectués à l'arrivée sur le site de production ou au départ du site du fournisseur. Aussi, tout lot d'ingrédient ne respectant pas les critères de pureté ne sera pas inclus dans le cycle de production. Toutes les étapes de la réception des matières à la libération des produits fabriqués doivent faire l'objet d'enregistrements permettant de garantir la traçabilité.

5. Assurance qualité

Elle concerne les audits et revue de direction, la gestion des produits non conformes, la gestion de la documentation, l'identification du produit, traçabilité en amont et en aval, la formation et qualification du personnel et la métrologie.

La politique de qualité et de sécurité doit intégrer le respect des règlementations relatives à l'hygiène des denrées alimentaires dont la définition est « l'ensemble des mesures et les conditions nécessaires pour maîtriser les dangers et garantir le caractère propre à la consommation humaine d'une denrée alimentaire compte tenu de l'utilisation prévue ». (7)

C. Etiquetage

1. Mentions spécifiques aux compléments alimentaires

Selon la règlementation européenne de la directive 2002/46/CE puis du règlement (UE) n°1169/2011 en application depuis le 14 décembre 2014. L'étiquetage des compléments alimentaires comporte la dénomination légale de vente « complément alimentaire ». Cette dénomination de vente doit être également accompagnée de mentions complémentaires prévues par la réglementation.
Doivent également être mentionnés et apposés sur l'étiquette :

- Si emploi d'édulcorants, il faut apposer la mention « avec édulcorants »
- Le nom des catégories de nutriments ou substances caractérisant le produit ou une indication relative à la nature de ces nutriments ou substances.
- L'état physique (effervescent, comprimés, poudre…)
- Le traitement qu'a subi la denrée
- La quantité nette (si liquide, en unité de volume : L, cL, mL et pour les autres produits : exprimé en unité de masse : g, mg).
- La date de durabilité minimale ou DLC avec la précision, si nécessaire, des conditions de conservation préconisées.

La dénomination du complément alimentaire, la quantité nette et la date de durabilité minimale/DLC doivent apparaître dans le même champ visuel.

- Le lot : l'indication du lot permet de regrouper un ensemble de denrées selon un système établi par l'industriel, facilitant ainsi l'identification des produits en cas de défaut, de recherche et de réclamation. Ce numéro doit être envoyé au responsable de la mise sur le marché en cas de réclamation.

- Les coordonnées du fabricant ou du conditionneur ou du vendeur établi à l'intérieur de la communauté européenne.
- Le nom : commercial, dénomination ou raison sociale de la société.
- L'adresse du responsable de la mise sur le marché, du fabricant, du conditionneur ou vendeur établi à l'intérieur de la communauté européenne. A cela peut s'ajouter l'identification de l'emballeur : suivi du code EMB ou de l'adresse.
- Le mode d'emploi : conditions et conseils d'utilisation et de conservation pour assurer la sécurité du consommateur afin qu'il fasse un usage approprié du complément alimentaire acheté.
- La liste des ingrédients avec :
    - La mention du nom des catégories de nutriments ou des substances caractérisant le produit ou une indication relative à la nature de ces nutriments ou substances. Ils sont désignés par leur nom spécifique (pour les additifs, il s'agira de la mention de la catégorie suivie soit du nom spécifique soit du numéro CE). Ils sont énumérés dans la liste des ingrédients par ordre d'importance pondérale décroissante jusqu'à 2% dans le produit fini. L'ordre ne peut pas être respecté en deçà de 2% dans le produit fini.
    - La portion journalière de produit dont la consommation est recommandée.
    - Un avertissement indiquant qu'il est déconseillé de dépasser la dose journalière indiquée.
    - Une déclaration visant à éviter que les compléments alimentaires ne soient pas utilisés comme substituts d'un régime alimentaire varié et équilibré.
    - Un avertissement indiquant que les produits doivent être tenus hors de portée des jeunes enfants.

Le règlement (UE) n°1169/2011 INCO concernant l'information des consommateurs sur les denrées alimentaires apporte des nouveautés concernant les mentions à apposer sur une étiquette de compléments alimentaire :

- Les ingrédients se présentant sous forme de « nanomatériaux manufacturés » doivent être étiquetés. Il faut noter que les nanomatériaux considérés soient

définis comme étant « produit intentionnellement ». Une définition précise des « nanomatériaux manufacturés » est attendue au niveau européen.

- Le pays d'origine du produit devra, dans certains cas, être indiqué.
- Une taille minimale de caractères est définie pour l'indication des mentions obligatoires, en fonction de la taille de l'emballage ou du récipient (0,9 ou 1,2 mm)
- Les allergènes devront être mis en évidence afin d'être clairement distingués du reste de la liste des ingrédients (corps ou style de caractère différent, couleur de fond…)
- Les supports n'auront plus besoin d'être étiquetés.

La sécurité des compléments alimentaires sportifs passe également la sécurité de du travail mené entre les industriels agroalimentaires et les parties concernées par la lutte contre le dopage, en lien avec le contexte actuel de l'alimentation du sportif. Elle s'inscrit dans la prévention du dopage pilotée par le ministère des Sports, de la Jeunesse, de l'Education populaire et de la Vie Associative. (8)

2. Norme AFNOR NF V 94-001 destinée à la lutte anti-dopage

Cette norme a été adoptée le 14 juin 2012 pour permettre aux sportifs de connaître les compléments ou les denrées alimentaires ne contenant pas de substances dopantes. En effet, cette norme est à la conclusion d'une démarche de protection des consommateurs, notamment des sportifs de haut-niveau potentiellement concernés par des substances inscrites sur la liste des interdictions et susceptibles d'entrainer un contrôle antidopage positif.

Cette liste de substances interdites dans le monde du sport a d'ailleurs été mise à jour par l'arrêté du 23 février 2018. Elle est également consultable via le site de l'Agence Mondial Antidopage (AMA) différenciant les substances interdites en permanence, les substances interdites en compétition et les substances interdites seulement dans certains sports.

La norme NF V 94-001 « Prévention du dopage dans le sport – Compléments alimentaires et autres denrées alimentaires destinés aux sportifs – Bonnes pratiques de développement et de fabrication visant l'absence de substances dopantes » résulta d'un travail collaboratif. C'est un groupe de réflexion, constitué par l'AFNOR, regroupant les personnes déjà impliquées dans le Ministère des Sports, comme l'Agence Française de Lutte contre le Dopage (AFLD), l'ANSES, la DGCCRF et la Direction Générale de la Santé (DGS), le Syndicat Français de la Nutrition Spécialisée (SFNS), SYNADIET, la société WALL et d'autres venant étoffer la commission de normalisation pour assurer une représentativité des intérêts. (9)

Ainsi, en adoptant cette norme, les fabricants industriels s'engagent à garantir la composition de leurs compléments alimentaires et l'absence de substances interdites pouvant conduire à un contrôle antidopage positif. La mention « NF V 94-001 » sur l'emballage du produit permet d'identifier facilement les compléments alimentaires ou denrées alimentaires dépourvus de substances dopantes.

D'après l'organisme AFNOR, différentes études (notamment celle publiée dans le British Journal of Sport Medecine « A–Z of nutritional supplements: dietary supplements, sports nutrition foods and ergogenic aids for health and performance ») attestent que certains compléments alimentaires destinés aux sportifs, provenant notamment de pays tiers et/ou achetés sur internet, peuvent contenir des substances dopantes. Outre les conséquences potentiellement néfastes pour la santé, leur utilisation peut donc amener à un contrôle antidopage positif et d'entrainer une sanction à l'encontre du sportif.

D. Commercialisation

1. Déclaration de mise sur le marché

Elle est obligatoire depuis le 25 mars 2006 et doit être effectuée conformément :

- Au décret « compléments alimentaires » n°2006/352 qui fixe les éléments requis
- A l'arrêté du 14 juin 2006 relatif aux modalités de transmissions des déclarations de première mise sur le marché. Cet arrêté demande que cette

déclaration soit adressée à la DGCCRF et effectuée au titre de l'article 15 ou de l'article 16.

- A la « note d'information de la DGCCRF n°2006/352 du 30 novembre 2006 » destinée à aider les professionnels à mettre en application les dispositions du décret détaillant les éléments attendus.

2. Distribution des compléments alimentaires

Le circuit de distribution doit permettre de garantir la traçabilité jusqu'aux points de vente grâce à des procédures ad hoc mises en place conjointement par les responsables de la mise sur le marché et leurs intervenants. Il en découle la nécessité de communiquer aux professionnels les précautions à prendre en matière de stockage, conservation et présentation des produits.

L'article 18 du règlement 178/2002 impose aux exploitants du secteur alimentaire d'identifier, d'une part, leurs fournisseurs d'ingrédients, d'articles de conditionnement et de manière générale de toute substance destinée à être incorporée ou susceptible d'être incorporée dans une denrée alimentaire et, d'autre part, leurs clients auxquelles ils ont fourni leurs produits finis.

Une telle exigence de traçabilité permet d'identifier l'ensemble des acteurs intervenant dans une chaîne ayant conduit à la mise sur le marché d'un complément alimentaire. Il sera donc plus aisé d'identifier, par ce biais, tous les acteurs concernés par une éventuelle opération de retrait ou rappel d'un produit. (7)

E. Sécurité concernant la post-commercialisation

En France, comme vu précédemment, il existe le dispositif de nutrivigilance déployé par l'ANSES pour permettre aux professionnels de santé de signaler un effet indésirable directement imputable à un complément alimentaire.

En conclusion, la sécurité de la consommation d'un complément alimentaire est garantie à chaque étape du circuit de fabrication, en France. Dans d'autres pays, la règlementation des compléments alimentaires peut être différente et le fait d'acheter

sur Internet, produit potentiellement provenant d'un autre pays, expose à un risque pour le consommateur. Bien se renseigner avant l'achat d'un complément alimentaire destiné aux sportifs est essentiel, ne serait-ce qu'au point de vue sécurité de consommation étant donné des différences de réglementation qui peut exister.

V. Allégation nutritionnelle et de santé (ANS)

A. Définition

Une allégation nutritionnelle communique ou suggère qu'une denrée alimentaire possède des propriétés nutritionnelles bénéfiques.

Une allégation de santé est toute mention utilisée sur les étiquettes, à des fins de publicité, ou sur des produits de marketing selon laquelle la consommation d'un aliment donné peut avoir des bienfaits pour la santé.

B. Réglementation

Les allégations font l'objet d'un cadre harmonisé à l'échelle européenne grâce au règlement 1924/2006, dont les allégations nutritionnelles autorisées sont inscrites à l'annexe du règlement. Depuis l'entrée en vigueur de ce texte, c'est l'EFSA qui est chargée d'évaluer les allégations de santé avant la mise sur le marché du complément alimentaire.

L'EFSA est chargée de vérifier le bien-fondé scientifique des demandes d'allégations introduites, certaines étant déjà utilisées actuellement ou d'autres étant proposées par des demandeurs d'autorisations, c'est-à-dire des compagnies qui souhaitent soumettre des allégations au processus d'autorisation de l'Union Européenne. Ces informations sont ensuite utilisées comme fondement scientifique par la Commission européenne et les Etats membres pour décider s'ils autorisent ou non l'utilisation de ces allégations.

La Commission européenne est également l'instance chargée d'établit le registre d'allégations autorisées. Pour cela, la Commission européenne centralise l'ensemble des demandes d'allégations génériques, faisant le lien entre un nutriment et une fonction de l'organisme, transmises par les Etats membres.

C. En France

Deux instances permettent le suivi du respect des ANS :

- La DGCCRF : instance chargée de surveiller le respect de la réglementation concernant les ANS.
- L'ANSES : participe à l'évolution de la règlementation en matière d'ANS en fournissant un appui scientifique et technique.

VI. Circuit de distribution

A. Au niveau mondial

Le marché de la nutrition sportive est en plein essor. En effet, malgré une image entachée par un passé douteux (scandales liés au dopage ou d'une image caricaturale des culturistes), le marché a su se renouveler pour toucher une plus grande partie de la population attirant logiquement un nombre croissant d'industriels.

Le marché mondial de la nutrition sportive était de 28,4 milliards d'euros en 2016 et promet d'atteindre 45,2 milliards d'euros d'ici 2022 selon la compagnie Zion réalisant des études de marché. (cf Figure 1) (10)
On remarque que la majorité des produits de nutrition sportive vendus concerne des produits consommés dans le cadre du développement de la masse musculaire.

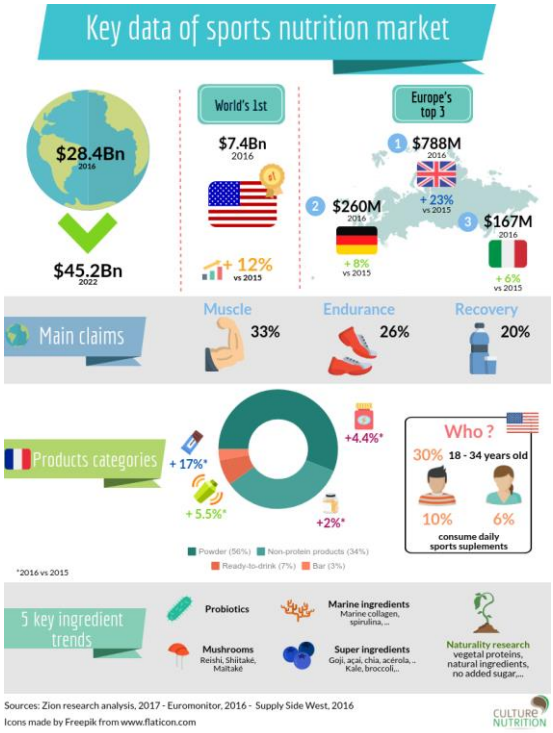
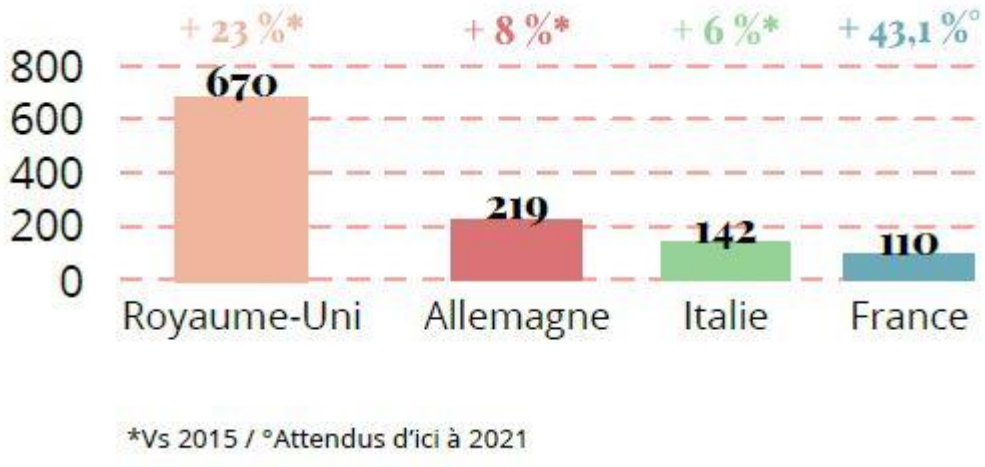


Figure 1 : Les chiffres clefs du marché mondiale de la nutrition sportive

B. A l'échelle européenne et française

Figure 2 : Marché européen de la nutrition sportive en 2016



On remarque que cette dynamique de croissance s'applique également à l'échelle européenne et française.

En Europe, la France est le 4e pays consommateur de compléments alimentaires sportifs derrière l'Italie, l'Allemagne et le Royaume-Uni. Cependant, d'après les prévisions du marché, le France est le pays qui connaîtra la plus forte croissance durant ces prochaines années.

En effet, le marché de la nutrition sportive était évalué à 110 millions d'euros en 2016 et promet une croissance de 43,5% d'ici 2021. (cf Figure 2)

Force est de constater qu'il devient important, pour tout pharmacien, en tant qu'acteur du circuit de distribution, d'être attentif aux évolutions du marché des compléments alimentaires sportifs. (11)

C. De nombreux réseaux de distribution

Il existe en effet de nombreux réseaux de distribution de compléments alimentaires sportifs. De ce fait, il est donc aisé pour le consommateur de s'en procurer mais tous ces réseaux n'assurent pas une consommation sécurisée.
Parmi ces réseaux de distribution, on citera :

- Internet
- Magasins spécialisés de la nutrition sportive
- Supermarchés pour certains produits
- Parapharmacie
- Pharmacie d'officine
- Salles de sport

Parmi ces réseaux ces 6 réseaux de distribution, seulement 3 d'entre eux comprennent du personnel formé pour vendre des compléments alimentaires sportifs : les pharmacies d'officine, les parapharmacies et les magasins spécialisés de nutrition sportive.
Parmi ces 3 derniers réseaux de distribution, seulement 2 sont réellement soucieux face à la sécurité des produits et sont également armés pour réagir en cas de problèmes diverses liés à la consommation du complément alimentaire sportif grâce à des procédures de pharmacovigilance : les pharmacies d'officine et les parapharmacies.

PARTIE II : LE CULTURISME

I. Généralités

A. Définition

Plus connu sous le terme anglais bodybuilding, le culturisme est une pratique visant à augmenter sa masse musculaire (hypertrophie musculaire) dans un but esthétique. C'est un véritable mode de vie alliant :

- Une pratique sportive pluri-hebdomadaire (voire bi-journalière pour les professionnels) d'exercices de résistance musculaire et d'exercices cardio-vasculaires.
- Un contrôle plus ou moins strict, selon le pratiquant, de l'alimentation.
- Un repos de qualité.

Pour obtenir l'hypertrophie musculaire attendue, les exercices de levé de poids en résistance répétés provoquent des micro-déchirures dans les fibres musculaires impliquées. La croissance du muscle résulte de la réparation de ces micro-déchirures et les fibres musculaires se reforment plus fortes et plus nombreuses permettant ainsi l'hypertrophie musculaire.

Cependant, pour se reconstruire, les fibres musculaires ont besoin de substrats et c'est là que l'alimentation joue un rôle prépondérant puisqu'il faut un apport important de protéines pour reconstruire le muscle, un apport de glucides pour reconstruire le stock de glycogène du muscle et un apport de lipides, précurseurs d'hormones (androgéniques comme la testostérone) et composant de membrane cellulaire. De là, on en déduit l'importance à la fois de la qualité des substrats et également qu'il est nécessaire de respecter des proportions équilibrées des différents macronutriments cités : glucides, protéines, lipides.

B. Fédérations et catégories

Il existe de très nombreuses fédérations amateures aux quatre coins du monde. Cependant, il n'existe qu'une fédération professionnelle qui est l'IFBB (Fédération Internationale de Bodybuilding et de fitness). Cette fédération organise de nombreuses compétitions dans le monde entier au niveau local, régional, national, continental et les championnats du monde dont les plus prestigieuses sont les compétitions Mr. Olympia et l'Arnold Classic. (12)

Il existe également beaucoup de compétitions organisées par des fédérations amateurs qui permettent aux participants et gagnants d'être repérés au niveau international par des sponsors ou autres contrats.

Dans ces compétitions, le physique des culturistes est évalué par un jury dont les critères de jugement diffèrent selon les catégories. Nous allons voir ci-dessous les différences entre certaines catégories, les plus prisées du monde du culturisme.

- La catégorie Men's classic bodybuilding :

    - Tenue : Bas de maillot unis avec coloris au choix
    - Posing : une partie imposée et une routine libre
    - Critères de jugement : la symétrie, la ligne, la tonicité, le développement musculaire, la vascularité et la définition (13). En soit, c'est la catégorie où il faut être le plus musclé, le plus volumineux, le plus sec et le plus symétrique.

- La catégorie Men's physique :

    - Tenue : Short ou boardshort qui est un short arrivant au-dessus du genou
    - Posing : Face aux juges dans une position sans contraction à outrance main sur la hanche et sous ordre des juges feront les 4 faces (face, côté, dos, coté et revenir de face). Ces transitions se feront aux choix de l'athlète.

- Critères de jugement : Symétrie, ligne et tonicité. (14) C'est uniquement le haut du corps qui est jugé, il doit être harmonieux, symétrie avec une bonne densité musculaire. Les jambes ne sont pas jugées.

- La catégorie Men's classic physique :

  - La particularité de cette catégorie est qu'il faut respecter un ratio taille poids consultable dans le règlement de la catégorie.
  - Tenue : Short court noir uni
  - Posing : Imposé et une routine libre
  - Critères de jugement : la tonicité, la symétrie, la densité musculaire et la définition. (15)

- La catégorie bikini :

  - Tenue : chaussures à talon, maillot deux pièces, bijou accepté
  - Posing : il comporte le T-walking pour se diriger sur la scène (démarche particulière de cette catégorie), et pose de face et de dos avec transition.
  - Critères de jugement : ligne, tonicité, équilibre, féminité, beauté du visage, tonicité musculaire, définition, qualité de peau, élégance et tenue sur scène. Dans cette catégorie, pas de sèche et de masse musculaire à outrance. (16)

- La catégorie Women's physique :

  - Tenue : maillot deux pièces décent, uni, léger maquillage admis
  - Posing : imposé et routine libre
  - Critères de jugement : la symétrie, la tonicité, le développement musculaire, la vascularité et la définition. (17) C'est la catégorie où le développement musculaire est supérieur aux autre catégories femmes.

II. Historique

A. Histoire du culturisme

1. La Grèce antique

Les premières représentations concrètes d'hommes musclés datent de la Grèce Antique. La Grèce était le pays des jeux olympiques et pour se préparer, ils pratiquaient une forme de culture physique dans des gymnases à ciel ouvert avec des matériaux lourds comme du marbre ou des pierres.
Les penseurs grecs de l'époque (Aristote, Platon, etc.) enseignaient déjà l'équilibre du corps et de l'esprit. La beauté physique avait une place prépondérante au sein de leur culture et la force physique était érigée tel un art.
Le sportif le plus connu de cette époque est le lutteur Milon de Crotone, rendu célèbre par ses nombreux titres olympiques et lorsqu'il porta un veau et par la suite un taureau sur son dos, démonstration de force qui lui a valu d'être une légende grecque encore aujourd'hui. (18) (19)

2. En France

La culture physique disparût ensuite pendant plusieurs siècles jusqu'au XIXe siècle. En effet, un passionné d'exercices de gymnastiques grecs et latins fonde en 1849 le premier gymnase de Paris. Son nom est Hippolyte Triat, artiste de cirque et athlète spécialisé dans les numéros de poses plastiques et de levée de poids, et teste dans son gymnase différents agrès, appareils à poulies avec charge automatique, haltères, barres longues, massues, etc. Et cela fait de lui l'inventeur du principe de localisation musculaire. (18) (20)

Cependant, il n'existe ni traités, ni revues. C'est à Edmond Desbonnet à qui l'on doit aujourd'hui la culture physique telle qu'elle existe puisque personne avant lui n'avait songé ni à l'entrainement méthodique ni aux effets des exercices musculaires sur le corps humain. Il met en avant le lien étroit entre esthétisme, santé et force. En 1885, il ouvre sa première école de « culture physique » à Lille et grâce à la formation de professeur, un réseau de salle se développe en France et un journal est créé : « Culture Physique ». (18)

3. En Europe

Malgré cela, le pionnier du culturisme moderne et de ce fait le premier culturiste reconnu est l'allemand Eugen Sandow. Passionné des statues de l'Antiquité grecque depuis son plus jeune âge, Eugen Sandow est un artiste qui se produisait dans des spectacles de cirque pour des démonstrations de force. Il se produisait à travers le monde dans des expositions. En 1889, il remporte le concours d'homme le plus fort de Londres lors de sa première participation et acquiert de ce fait une grande popularité en Grande-Bretagne. Il se distinguait également de ses autres concurrents par le soin qu'il apportait à son apparence. Son obsession était de reproduire à l'identique les proportions idéales des statues de Grèce Antique.
En 1901, il organise la première compétition de culturisme appelée « The Great Competition » au Royal Albert Hall de Londres avec pour jury, Sir Charles Lawes (sculpteur), Sir Arthur Conan Doyle (auteur) et Eugen Sandow lui-même. (21)

Eugen Sandow fût également un homme d'affaire avisé grâce à sa renommée mondiale et inventeur des sangles en caoutchouc conçues pour l'exercice. Il créé son magazine « Sandow », il lance une entreprise de conception et vente de matériel d'exercice par correspondance (Sandow Applicance Company) et une autre entreprise dans la production et la promotion d'un fortifiant pour l'entrainement (Sandow's Health & Strengh Cocoa). (22)

Ce sont les prémices des compléments alimentaires pour sportifs d'aujourd'hui.

4. Amérique du Nord

Avançons jusqu'au milieu du XXe siècle et la création en 1946 par deux frères canadiens, Joe et Ben Weider à Montréal, de la fédération internationale de bodybuilders (IFBB). Les deux pays fondateurs de cette fédération sont le Canada et les Etats-Unis.
La fédération croît rapidement grâce à la promotion faite par les deux frères et c'est en 1965 qu'est organisée la première et la plus prestigieuse des compétitions : Mr. Olympia. Pour l'anecdote, le trophée remis au vainqueur n'est autre qu'une statue à l'effigie d'Eugen Sandow.

En 1970, l'IFBB compte des représentants dans plus de 50 pays à travers tous les continents.
En 2004, l'IFBB est rebaptisée la Fédération internationale de bodybuilding et fitness tout en gardant le signe IFBB. Puis en 2005, la section professionnelle de l'IFBB se sépare légalement de l'IFBB pour former l'IFBB ligue professionnelle, une entité juridique indépendante avec ses propres règles et règlements. (23)

B. Histoire de l'utilisation des compléments alimentaires dans le culturisme

1. Retour en Grèce Antique

Lors des préparations des jeux olympiques, les préparateurs physiques des sportifs préconisaient un régime carnivore abondant, riche en protéines, alors qu'habituellement, l'alimentation grecque de l'époque était frugale, composée de céréales, d'olives, de raisin et de légumineuses. Déjà à cette époque, les athlètes étaient pointés du doigt par leur contemporains à cause de leur excès alimentaire et carnivore. (24)

A cette époque, les bienfaits du lactosérum, encore appelé petit-lait et qui n'est autre que le composant de nos protéines en poudre, a été découvert par Hippocrate, qui l'utilisait pour soigner la goutte et les maladies hépatiques. (25) Il n'était pas utilisé par les sportifs mais dans la médecine traditionnelle de l'époque.

2. Idées naissantes du XIXe siècle

Pour comprendre comment aujourd'hui il existe des poudres de protéines et des compléments alimentaires utilisés par les sportifs, il faut retourner aux origines de l'industrie du lait, de la viande et des progrès de la chimie et de la biochimie.

1. Naissance de sources de protéines en poudre

Déjà au XVIIe siècle, il y avait ce qui était appelée la « gelée de chair », réduction de viande dans un bouillon, et était utilisée en médecine dans les affections fébriles, notamment respiratoires.
Au XVIIIe siècle, c'est plutôt sous forme de bloc solide appelé « glace de viande », préparé à partir de veau et de porc, que l'on retrouve ces concentrés de protéines. De ces blocs était préparées des soupes portatives en les faisant se dessécher permettant aux marins qui en emportaient de ne pas souffrir du scorbut. Cependant, ce produit était à l'époque surtout artisanal, non produit à l'échelle industrielle. (26)

C'est en 1862, soucieux d'aider les personnes sous-alimentées, que le chimiste allemand Julius von Liebig, voyant le gaspillage des carcasses de bœufs dans les pays à fort élevage, décide de faire de la recherche sur la conservation de la viande de bœuf permettant de garder sa valeur nutritive, au moins utilisable pour des personnes malades ou affaiblies (26). Il se lance dans la production industrielle de son extrait de viande mais les progrès en physiologie des années 1870 conduiront à une révision à la baisse de la valeur nutritive de ces extraits et ne seront commercialisés que sous forme de condiments (encore utilisés aujourd'hui).

Cependant, en parallèle, en 1865, il présente un substitut de l'alimentation au sein qui connaît un grand succès. Il créé le premier « lait artificiel pour nourrisson » composé de malt et de carbonate de potassium destiné à être versé dans un mélange de lait et de farine. C'est un abus de langage de dire que c'est le premier lait artificiel infantile puisque celui-ci sera mis au point en 1874 par Gail Borden où le lait en poudre inclus dans la préparation remplace le lait liquide. (27) (28)

L'invention du lait en poudre et de l'extrait de bœuf constitue les prémices de la nutrition sportive utilisée pour améliorer les performances de sportifs.

En effet, dans les années 1890, des entreprises ont commencé, grâce aux travaux de recherche sur la fabrication de lait en poudre, à commercialiser des produits hyperprotéinés comme fortifiants améliorant les capacités physiques : Bovril, Plasmon et Cadbury's Cocoa. Le plasmon déclare même agir sur l'intellect et les fonctions nerveuses. (29)

Ces entreprises ont différentes stratégies marketing pour vendre leur produit et utilisent des figures du culturisme de l'époque pour en faire la publicité. Ainsi, Eugen Sandow fit la promotion du Plasmon, protéine en poudre provenant du lait écrémé. (29)

Ce sont les premières traces d'utilisation de produits pour sportifs destinés à augmenter les performances physiques et à augmenter la masse musculaire.

2. Découvertes chimiques

C'est en effet au XIXe siècle que l'isolement et la structure chimique de la plupart des acides aminés ont été découvert.

- 1819 : isolation de la leucine par le chimiste français Joseph Louis Proust
- 1850 : isolation de l'alanine par le chimiste allemand Adolph Strecker (30)
- 1856 : isolation de la valine par le chimiste germano-autrichien Eugen Freiherr von Group-Besanez
- 1866 : isolation de l'acide glutamique par le biochimiste allemand Karl Heinrich Ritthausen puis la structure de l'acide glutamique et de la glutamine sont déterminés en 1872 par William Dittmar
- 1886 : isolation de l'arginine par le chimiste allemand Ernst Schulze (31)

Les effets de ces acides aminés étaient encore inconnus à l'époque mais le fait de pouvoir isoler un acide aminé est une avancée majeure pour en comprendre les mécanismes par la suite.

On peut également noter la découverte de la créatine en 1832 par le français Eugène Chevreul qui l'a isolé d'extraits de muscles d'animaux et lui a donné le nom de créatine qui vient du grec « kreas », viande ou chair.

Quelques années plus tard, en 1847, le scientifique Justus von Liebig lui attribue un rôle dans l'activité musculaire, en observant que les renards en liberté contiennent plus de créatine que les renards captifs.

3. Le XXe siècle et ses nombreuses découvertes biochimiques

Au XXe siècle sont découverts les principaux mécanismes qui encadrent la biochimie telle que nous la connaissons aujourd'hui.

On note la découverte majeure du cycle de Krebs ou cycle de l'acide citrique, processus complexe qui fournit l'énergie aux organismes vivants, par le biochimiste Hans Krebs en 1937. Cette découverte lui a d'ailleurs valu le prix Nobel de physiologie de médecine en 1953. (32)

Cette découverte fût indispensable pour comprendre quelles sont les voies métaboliques permettant de fournir de l'énergie mais également quels en sont les produits, formation d'acide lactique en anaérobie par exemple, expliquant les douleurs ressenties dans les muscles lors d'un exercice intense de musculation.

Au scientifique Hans Krebs, nous lui devons également la découverte du cycle de l'urée en 1932 et ses intermédiaires comme la citrulline et l'arginine. (33)

Dans les années 1980, sont découvertes les propriétés biologiques du monoxyde d'azote (NO) en tant que molécules de signalisation dans le système cardiovasculaires par les scientifiques Ferid Murad, Robert F. Furchgott et Louis J. Ignarro et ont été récompensés en 1998 du Prix Nobel de médecine. (34)

En 1994, est découvert le mécanisme moléculaire de la stimulation de la synthèse protéique impliquant un complexe enzymatique appelé mTOR. C'est en 1998 que l'on démontre que les acides aminés et plus particulièrement la leucine permettaient l'activation du complexe mTOR grâce aux travaux de Hara et al.
On notera également que ce sont dans le milieu de ces années 1990 qu'a été découvert les effets d'un métabolite actif de la leucine, le bêta-hydroxy bêta-méthylbutyrate, par Steven L. Nissen.

C'est ainsi que les majeures découvertes biochimiques ont été faites à la fin du XXe siècle. Encore aujourd'hui, nous ne connaissons pas tous les rôles et actions in-vivo

des différents acides aminés et des mécanismes liés à l'alimentation qui régissent l'hypertrophie musculaire.

4. L'utilisation de compléments alimentaires des années 1930 jusqu'à aujourd'hui

1. Des années 1930 aux années 1980

Pour commencer, il n'y a que peu de preuves de l'utilisation de compléments à l'alimentation à ces époques dans le culturisme mis à part l'utilisation de protéines en poudre à base d'un mélange d'œufs et de lait consommées jusque dans les années 1960.
Ce peu de preuves et l'absence d'utilisation de compléments à l'alimentation sont dues à deux faits majeurs.

Tout d'abord, le culturisme et l'haltérophilie, à l'époque, n'étaient pas populaires et n'étaient qu'une pratique marginale qui ne s'adressaient qu'à une petite partie de la population. De plus, l'alimentation, la pratique d'une activité physique et la relation entre les deux en lien avec une bonne santé n'était pas une préoccupation de ces époques ni un enjeu de santé publique. De ce fait, les connaissances en matière d'alimentation et d'activités sportives n'étaient que peu connus à l'époque et la communauté scientifique ne s'y est intéressée que plus tard, lorsque les problèmes liés au poids et la santé sont devenus un enjeu de santé publique.

Et deuxième fait majeur, c'est l'apparition des stéroïdes anabolisants. Ces stéroïdes ne sont pas l'objet de cette thèse mais c'est une découverte importante pour l'histoire du culturisme.

C'est en 1931 qu'Adolf Butenandt, chimiste allemand, extrait le premier stéroïde connu, l'androstérone, à partir de l'urine et c'est en 1934 que Léopold Ruzicka synthétise l'androstérone. Puis en 1935, un androgène plus puissant contenu dans les testicules est découvert puis synthétisé : la testostérone.
Des essais cliniques sur l'homme commencent dès 1937 et impliquaient des doses orales de méthyl-testostérone et des doses injectables de propionate de testostérone.

Pour l'anecdote, le propionate de testostérone est mentionné dans une lettre au rédacteur en chef du magazine de culturisme américain Strength and Health en 1938, la plus ancienne référence connue de l'utilisation de stéroïdes anabolisants aux Etats-Unis.

Les études et le développement musculaire par l'utilisation de la testostérone se sont poursuivies dans les années 1940 en Union soviétique et les pays de l'Est où les stéroïdes sont utilisés pour améliorer les performances des haltérophiles lors des jeux olympiques et autres compétitions amateurs.

C'est en réponse au succès des haltérophiles russes que le médecin de l'équipe olympique américaine d'haltérophilie, et lui-même haltérophile, le docteur John Ziegler, met au point un stéroïde dénommé methylandrosténolone encore connu aujourd'hui sous le nom de DIANABOL. Ce stéroïde sera commercialisé par la société Ciba Pharmaceuticals et autorisé par la Food and Drug Administration (FDA) aux Etats-Unis en 1958.

Le DIANABOL est un analogue de la testostérone avec moins d'effets secondaires et est considéré comme une « pilule magique » par les culturistes et haltérophiles de l'époque et est à l'aube de la création d'une nouvelle ère de culturistes avec des physiques de plus en plus massifs et avec une masse adipeuse de plus en plus faible associée à une alimentation riche en protéines.

L'essentiel était bien sûr la consommation élevée de protéines. A l'époque, les culturistes consommaient beaucoup d'œufs, de laitages et de viande pour apporter un maximum de protéines à leur corps. Ils consommaient déjà, ce que l'on va voir plus tard, c'est-à-dire des protéines de lactosérum et caséine contenues dans le lait et de l'ovalbumine qui est la protéine de blanc d'œuf. D'ailleurs, les premières protéines en poudre étaient un mélange de protéines d'œufs et de lait pour reproduire le plus fidèlement possible l'aminogramme du lait maternel. (35)

2. Des années 1980 à aujourd'hui

Les compléments alimentaires en tant que tels ont connu leur essor dans les années 1980 lorsque les grandes marques de compléments alimentaires s'implantent en

pharmacie. C'est à partir des années 1980 que les industriels se penchent sur la fabrication des compléments alimentaires sportifs et produits enrichis pour sportif et grâce aux découvertes scientifiques de cette décennie, ils sont plus à même de répondre aux besoins des culturistes, pratique grandissante dans les années 1990.

A partir des années 1990, les compléments alimentaires à base de vitamines et minéraux sont de plus en plus recherchés et ont toujours eu de l'importance aux yeux des consommateurs, même aujourd'hui. Les protéines de lactosérum en poudre font également leur apparition dans ces années 1990.
Au fur-et-à-mesure, les différentes découvertes du rôle des protéines, du fonctionnement du métabolisme, des procédés de filtrations, améliorés grâce à la microfiltration et l'ultrafiltration, permettent in-fine de séparer avec précision et de concentrer divers produits contenus dans l'alimentation jouant un rôle dans la santé globale.

Nous entrons aujourd'hui, plus que jamais, dans une époque où une activité physique régulière est synonyme de bonne santé à long terme. Les médias sociaux relaient cela et ciblent la jeune population, mettant en avant les compléments alimentaires et produits pour sportifs en lien avec un mode de vie sain, dans une société où le physique, l'esthétisme et la confiance en soi sont mis en avant.

Aujourd'hui, nous comprenons les réponses métaboliques liés à diverses activités physiques qu'elles soient d'endurance, de force ou de construction musculaire. On connaît les acteurs de ces réponses et on en apporte de façon exogène pour subvenir aux besoins. Chaque laboratoire de produits sportifs est capable de répondre aux attentes des culturistes grâce à des produits leur permettant d'arriver à leurs objectifs esthétiques.

Nous allons dans cette prochaine partie une liste non exhaustive de produits pour sportifs, aliment enrichi ou complément alimentaire, destinés à la prise de masse musculaire, à l'augmentation des performances physiques et à la perte de masse grasse que l'on peut rencontrer bien souvent sur internet et parfois dans certaines pharmacies.

PARTIE III : PRESENTATION DE DIFFERENTS PRODUITS POUR SPORTIFS DESTINES A LA PRISE DE MASSE MUSCULAIRE, A L'AUGMENTATION DES PERFORMANCES PHYSIQUES ET A LA PERTE DE MASSE GRASSE RENCONTRES SUR LE MARCHE

Nous allons voir et traiter, dans ce chapitre, les différents aliments enrichis et compléments alimentaires les plus couramment utilisés dans le culturisme. Dans ce chapitre, seront également présentés les différents mécanismes d'action et propriétés de produits diverses. Concernant leur efficacité et les conseils liés à leur utilisation, nous verrons cela dans la dernière partie de cette thèse.

I. Les produits pour sportifs destinés à la prise de masse musculaire et maintien de la masse sèche

A. Présentation de différentes sources de protéines retrouvées en tant que suppléments en poudre

Les protéines sont constituées par l'assemblage d'acides aminés. Il existe 20 acides aminés donc 9 sont considérés comme des acides aminés essentiels, c'est-à-dire qu'ils doivent être apportés par l'alimentation puisque non produit par l'organisme.

Ces 9 acides aminés essentiels sont : la phénylalanine, la leucine, l'isoleucine, la valine, la méthionine, la lysine, la thréonine, le tryptophane et l'histidine.

Il existe différentes méthodes pour déterminer la qualité d'une protéine :

- Le score chimique
- Le ratio d'efficacité des protéines
- La valeur biologique
- Le PDCAAS : Protein Digestibility-Corrected Amno Acid Score traduit par le score de digestibilité des acides aminés d'une protéine
- Indicateur d'oxydation des acides aminés (IAAO)

En général, on utilise la valeur biologique, dépendant de nombreux facteurs mais en particulier sur sa composition en acides aminés. Ces valeurs sont comprises entre 0 et 100, celui-ci correspondant à la valeur biologique de l'œuf entier.

La mesure de digestibilité d'une protéine sera surtout utile pour les protéines végétales, moins bien absorbées que leur homologue d'origine animale.

Pour conclure cette introduction, la qualité d'une protéine in-vivo est généralement définie comme sa capacité à stimuler la synthèse de protéines musculaires et à promouvoir l'hypertrophie musculaire. (36) Théoriquement, Les sources de protéines d'origine animale présentent un pourcentage plus élevé d'acides aminés essentiels et serait donc supérieures pour stimuler la synthèse des protéines musculaires et promouvoir l'hypertrophie musculaire que les sources de protéines d'origine végétale. Cependant, nous étudierons cela dans le dernier chapitre.

1. Les protéines laitières

1. Introduction

Le lait entier contient deux fragments protéiques :

- 70 à 80% de la fraction protéique correspondent à la caséine
- 20 à 30% de la fraction protéique correspondent aux protéines de lactosérum

Ces deux fractions sont une source complète d'acides aminés alimentaires puisque sont d'origine animale. C'est-à-dire que ces deux sources contiennent tous les acides aminés essentiels en nombre suffisant pour le bon fonctionnement de l'organisme à condition d'apporter la quantité minimale de protéines recommandées.

Cette séparation est appelée l'étape de coagulation du lait grâce, dans la plupart des cas, à la chymosine (37) qui permet de solidifier le fragment de la caséine et d'avoir un surnageant appelé le lactosérum qui donc la fraction soluble. C'est une étape cruciale pour la fabrication du fromage (nécessitant de la caséine pour fournir une base solide) mais également pour la préparation du lait destiné à la préparation de suppléments. (38)

Lors de la production de suppléments à base de protéines de lait, des préparations spéciales doivent être faites au préalable pour séparer les sources de protéines des calories de lactose et de graisses.

Ensuite, s'effectue une séparation des deux fractions protéiques du lait par un processus appelé la « synérèse ». Le degré de synérèse varie en fonction de ce que sera le produit final (en général du fromage) et peut être effectué par une étape de salaison, acidification, traitements enzymatiques ou perturbations physiques entre autres techniques pour fournir des produits uniques au niveau des saveurs et textures du fromage produit. (39)

2. Le lactosérum

a. Différentes formes de protéines de lactosérum

Le lactosérum correspond donc à la fraction protéique soluble du lait, le surnageant après étape de coagulation du lait. Les protéines de lactosérum sont plus communément appelées protéines whey.

A l'origine, le lactosérum, « sous-produit » de l'industrie fromagère, était utilisé pour l'alimentation des animaux. Cependant, depuis les années 1970, les industriels ont décidé de valoriser ce produit et l'adapter à l'alimentation humaine (lait infantile, plats industriels préparés, etc.).

Il existe deux types de protéines de lactosérum en fonction de son origine :

- Whey dite « fromagère » : la plus couramment utilisée et vendue car la moins coûteuse puisqu'issue des déchets de l'industrie fromagère lui conférant certaines propriétés :
  Le niveau de dégradation des acides aminés augmente puisqu'il y a eu de nombreuses étapes de transformation chimico-physique et thermique au préalable. Ce qui a pour conséquence une diminution de la concentration en leucine avec cependant un enrichissement en BCAA.

- Whey dite « laitière » ou whey dite « native » ou encore whey « bioactives » directement issue du lait. N'ayant subi aucune étape de transformation (traitements thermiques et chimiques du lait) au préalable, elles sont considérées de meilleure qualité et attirent de plus en plus de consommateurs. Cependant, elle reste plus coûteuse que son homologue fromagère. (40)

Une fois les protéines de lactosérum obtenues (issues de la production fromagère ou directement extraite du lait), elles sont filtrées afin d'augmenter leur pureté et on obtient, en fonction du degré de filtration, des formes :

- Concentrées : composées de 29 à 80% de protéines en poids sec
- Isolats : composées à plus de 90% de protéines et obtenues avec des procédés de filtration plus poussées.
- Hydrolysats : composées également à plus de 90% donc maximum 30% des protéines sont hydrolysées, c'est-à-dire de protéines sous forme de di-, tri- et tétra-peptides permettant une assimilation plus rapide et sont des formes résultantes d'une prédigestion par des enzymes.

b. Le lactosérum : source de peptides bioactifs

Les acides aminés contenus dans le lactosérum peuvent s'associer de différentes manières de façon à créer des peptides bioactifs uniques importants en termes de qualité biologique.

Le lactosérum renferme :

- Des Bêta-globulines : peptides bioactifs majeurs du lactosérum, ils ont la capacité de se lier aux molécules aux molécules hydrophobes et amphiphiles améliorant l'absorption de nutriments liposolubles tout comme l'albumine de sérum bovin. (41) (42). Ces peptides sont composés d'environ 25% d'acides aminés à chaine ramifiées.

- L’albumine de sérum bovin (BSA) : elle permet la liaison des molécules hydrophobes et peut potentiellement augmenter l’absorption des nutriments liposolubles. (42)

- Les immunoglobulines : elles représentent 8% des protéines de lactosérum. Il existe une grande variété : IgA, IgM, IgG, IgD et IgE. Ces immunoglobulines possèdent dans leur conformation des ponts disulfures, source de cystéine capable d’induire la synthèse de glutathion aux vertus antioxydantes et ces immunoglobulines peuvent interagir avec le système immunitaire.

- Les glycomacropeptides (GMPs) : ce sont techniquement des protéines de caséine mais se retrouvent dans le sérum pendant l’étape de séparation du lait (référence site examine). Ces GMPs ont des particularités :

    - Sont étudiés pour leurs interactions avec la faim et l’hormone cholécystokinine (CCK), potentiel rôle sur la suppression de l’appétit. (43)

    - Servent à mesurer le taux de dénaturation des acides aminés dans une whey vendue dans le commerce. En effet, le fait de retrouver des GMPs dans le lactosérum prouvent que le lactosérum a subi de nombreuses étapes de transformation. Cependant, les GMPs sont riches en isoleucine et valine mais pauvres en leucine. Ils sont en faible quantité dans les whey d’origine laitière du fait du processus d’extraction.

- La lactoferrine : peptide retrouvé en petite quantité, son rôle est de se lier au fer et elle possèderait des effets anticancéreux. (44)

Ces principaux peptides se dégradent au fur-et-à-mesure des transformations que subissent les protéines de lactosérum. Nous avons vu que les whey d’origine laitière ne subissent que des procédés de filtration mécanique, évitant ainsi la dénaturation des différents peptides bioactifs. C’est pour cette raison que la whey d’origine laitière est également appelée whey « bioactives » et qu’elle est qualifiée de meilleure qualité que son homologue d’origine fromagère.

3. La Caséine

La caséine est donc la partie insoluble du lait. Elle contient également divers peptides bioactifs. Ces peptides peuvent exercer des effets biologiques dans les intestins avant et après prise en charge par un transporteur peptidique intestinale. (45)

En voici les principaux :

- Peptide alpha s1 : Connu pour avoir des propriétés anxiolytiques et améliorant le sommeil chez les personnes stressées. (46) (47). Tout comme le peptide c12, le peptide alpha s1 est également connu pour être inhibiteur de l'enzyme de conversion de l'angiotensine et de réduire la pression artérielle in-vivo chez le rat et in-vitro sur des cellules endothéliales humaines. (48)
  C'est également un peptide connu pour être allergène. (49)

- Peptide c12 : propriétés antihypertensive par inhibition de l'enzyme de conversion de l'angiotensine. (50) (51)

- GMPs : sont solubles dans l'eau donc se retrouve dans le lactosérum comme vu précédemment mais proviennent de la caséine kappa. Ils ne doivent pas se trouver dans les suppléments de caséine en temps normal.

- Casoxines et casomorphines : ce sont des peptides capables d'agir sur le système opioïde périphérique de l'organisme, impliqué dans la digestion. Les casoxines sont des antagonistes aux récepteurs opioïdes périphériques tandis que les casomorphines en sont agonistes, réduisant la motilité intestinale. (52) (53)

La caséine semble avoir une teneur relative en casomorphines plus élevée qu'en casoxines, ce qui pourrait expliquer la vitesse de digestion réduite après consommation.

Les suppléments de caséine sur le marché sont des caséines micellaires fabriquées par des procédés de microfiltration.

2. Les œufs

Les protéines d'œufs ont souvent été considérées comme une source idéale de protéine car leur aminogramme a été utilisé comme standard pour la comparaison d'autres protéines alimentaires. (54) En raison de leur excellente digestibilité et de leur teneur en acides aminés, les œufs sont une excellente source de protéines pour les athlètes. Les protéines issues des blancs d'œufs étaient d'ailleurs les plus utilisés jusque dans les années 1990.

La consommation d'œufs a été largement critiquée en raison de leur teneur en cholestérol mais un nombre suffisant d'études ont été faites pour démontrer qu'il n'y a aucune corrélation entre les maladies coronariennes et la consommation d'œufs. Le blanc d'œufs a toujours été privilégié par les athlètes puisque ne contiennent pas de gras.

Cependant, peu d'étude ont été faite sur la consommation de suppléments de protéines d'œufs et la performance sportive et le changement de composition corporelle. C'est en lien avec le manque de possibilités de financement par rapport au financement des produits laitiers. (55)

Au-delà de fournir de hautes qualités de protéines riches en leucine, les œufs ont été identifiés comme aliment fonctionnel car présentent des avantages pour la santé au-delà de la nutrition de base. (56) En effet, les œufs possèdent des nutriments importants jouant des rôles dans la prévention des diminutions de la fonction immunitaire après un entrainement intense. (57)

On pourra donc retrouver, parmi ces nutriments :

- La riboflavine
- Le sélénium
- La vitamine K1
- Une richesse en choline qui pourrait avoir des effets positifs sur la fonction cognitive (58)
- Des effets antioxydants par la présence de caroténoïdes, lutéine et zéaxanthine. (59)

3. Le bœuf

C'est également une source de protéines d'origine animale donc source de protéines à valeur biologique élevée puisque contient le plein équilibre des acides aminés essentiels dans une fraction similaire à celle retrouvée dans le muscle squelettique humain. (60)

C'est également une source de nutriments importants tels que le fer, le sélénium, la vitamine A, B9 et B12.

4. Protéines végétales

1. Soja

Elles sont une alternative aux protéines d'origine animale. Cependant, ces protéines végétales possèdent une valeur biologique plus faible que celles d'origine animale, notamment une teneur en leucine plus faible (cf Tableau 1), laissant suggérer une moindre efficacité sur la stimulation de la synthèse protéique. Nous aborderons la question de l'existence d'une différence d'efficacité entre les protéines végétales et animales dans le dernier chapitre.

Acides aminés essentiels	Isolat de protéine de lactosérum (g/100g)	Isolat de protéine de soja (g/100g)
Isoleucine	6,1	4,9
Leucine	12,2	8,2
Lysine	10,2	6,3
Méthionine	3,3	1,3
Phénylalanine	3,0	5,2
Thréonine	6,8	3,8
Tryptophane	1,8	1,3
Valine	5,9	5,0
Total de BCAA	24,2	18,1
Total d'AAE	49,2	36,0

Tableau 1 : Comparaison de composition nutritionnelle d'isolats de protéine de lactosérum et d'isolat de protéine de soja (61)

Le soja possède également des particularités :

- Présence de facteurs antitrypsiques (62) inhibant la trypsine et la chymotrypsine, altérant ainsi la digestion protéique. Cela a pour conséquence une moindre assimilation des protéines de soja par l'organisme par rapport à des protéines d'origine animale.

- Présence de molécules bioactives notamment les isoflavones : ce sont des phyto-œstrogènes, structure semblable au 17-bêta-estradiol, et peuvent se lier aux récepteurs aux œstrogènes alpha et bêta (Erα et Erβ). Ils sont connus pour avoir des propriétés hormonales et antioxydantes. Concernant les effets hormonaux, une récente étude de 2018 (63) démontre qu'une supplémentation en concentré de protéines de soja, couplé à des entrainements en résistance et comparé à une supplémentation en concentré de protéines de lactosérum, n'affecte pas sensiblement les biomarqueurs de la signalisation androgénique ou oestrogénique dans le tissu musculaire ou adipeux.

2. Autres : Riz, chanvre, pois

Il existe maintenant une multitude de sources de protéines végétales sur le marché. Cependant, leur utilisation et consommation restent anecdotiques.

Cependant, l'autre source de protéines végétales la plus fréquemment rencontrée en tant que supplément en poudre est le riz. C'est une source de protéine à valeur biologique moindre que les sources de protéines d'origine animale notamment, et encore une fois, dû à une concentration moins élevée de leucine, mais la protéine de riz possède des attraits particuliers.

En effet, les protéines de riz sont d'absorption moyenne à lente et la leucine contenue dans les protéines de riz possède une cinétique unique. Elle culmine plus rapidement que la leucine dérivée des protéines de lactosérum. (64)

5. Procédés de fabrication des diverses sources de protéines en poudre

1. Procédés de filtration

Les procédés de filtration sont les méthodes les plus utilisées pour la fabrication de protéines en poudre. Ces deux méthodes présentent leurs avantages et leurs inconvénients.

a. Méthode d'échange d'ions

La méthode d'échange d'ions expose la source de protéines, généralement le lait, à de l'acide chlorhydrique et à de l'hydroxyde de sodium permettant de charger électriquement la protéine. Cet ajout de charge permet par la suite de séparer, grâce à un gradient électrique, les protéines du lactose (sucre) et des graisses.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est bon marché et d'obtenir un filtrat contenant la plus grande concentration de protéines par rapport à son homologue de fabrication. Mais ce procédé possède également un inconvénient majeur, c'est le fait qu'il dénature certains peptides anticancérigène et immunostimulant contenu dans le lactosérum et vu précédemment. (65)

Cependant, du fait de son faible coût et donc du moindre coût du produit résultant, cette méthode de fabrication reste la plus utilisée par les industriels.

b. Microfiltration et ultrafiltration à flux croisé

Cette méthode de fabrication est basée sur l'hypothèse que le poids moléculaire des protéines est supérieur au poids moléculaire du lactose. C'est une séparation en fonction du poids moléculaire et non en fonction du gradient électrique.

Dans ces procédés de filtration sont utilisés des membranes poreuse céramiques d'un diamètre de 1 et 0,25 micromètre, respectivement, pour séparer le lactosérum et le

lactose. Par conséquent, les protéines restent piégées dans la membrane céramique tandis que les autres composants du lait passent au travers.

L'avantage majeur de cette technique de filtration est qu'elle ne dénature pas les protéines et peptides présents dans le lactosérum donc en résulte une protéine de meilleure qualité. Cependant, l'inconvénient est que cette technique est coûteuse (65) rendant le produit de cette méthode de filtration coûteux donc moins attirant par le consommateur et moins utilisé par les industriels.

2. Hydrolyse de protéines par voie enzymatique

Elle fait suite aux procédés de filtration et permet de pousser encore plus le degré de séparation des protéines en sous-produit, oligopeptides ou acides aminés individuels.

Lorsque les protéines sont consommées entières par un individu, elles sont digérées par une série d'étapes commençant par l'homogénéisation par mastication, suivie d'une digestion partielle dans l'estomac par une enzyme appelée pepsine.

De par le rôle de la pepsine dans l'estomac, une combinaison de peptides, de protéines et de quantités négligeables d'acides aminés uniques est libérée dans l'intestin grêle. S'en suit une hydrolyse partielle en oligopeptides, de 2 à 8 acides aminés ou entièrement hydrolysée en acides aminés individuels. (66)

Les produits, résultant de cette méthode d'hydrolyse par digestion enzymatique, contiennent di-, tri- et tétra-peptides.

De nombreuses études ont été réalisées sur les effets du fractionnement des protéines (ou degré d'hydrolyse) sur l'absorption des acides aminés et les réponses hormonales subséquentes.

Dans une étude effectuée par Morifuji et al. (67), ont été étudié les effets 12,5g de protéines de soja et de lactosérum hydrolysées ou non hydrolysées sur les variations plasmatiques d'acides aminés essentiels (AEE), des acides aminés à chaine ramifié (BCAA) et de l'insuline.

Cette étude a montré dans un premier temps que les acides aminés sont absorbés plus rapidement lorsqu'ils sont consommés sous forme de di-, tri- et/ou tétra-peptides par rapport aux acides aminés sous forme libre ou aux protéines complètes.
Dans un second temps, les résultats ont indiqué que les hydrolysats de protéines ont produit des réponses plus importantes que leurs homologues non hydrolysés dans le plasma pour chacune des variables.

Une autre étude, celle de Calbet et al. (68), visait à mesurer les réponses à l'insuline après consommation de solutions protéiques contenant la même quantité de protéines et de glucides. Chaque solution contenait 15g de glucose et 30g de protéines, l'une avec des protéines hydrolysées de lactosérum et l'autre avec du lait de vache (protéine, sucre, lipide).
Bien sûr, cette étude montre une augmentation plus rapide de la concentration d'acides aminés plasmatiques veineux avec les hydrolysats peptidiques par rapport au lait et une réponse insulinique nettement supérieur. Cependant, on s'aperçoit bien que cette étude possède une lacune importante, celle de la comparaison avec du lait dans sa totalité, sachant qu'il est composé à 80% de caséine, protéine d'assimilation lente.

Bien qu'il existe de nombreuses études comparant isolats et hydrolysats de protéines, la majorité d'entre elles ne montre aucun bénéfice significatif en faveur des hydrolysats. Certes ils sont absorbés plus rapidement de par leur forme hydrolysée mais aucune ne justifie un avantage certain à son utilisation. D'avantages d'études doivent être réalisées pour déterminer pleinement l'impact potentiel des protéines hydrolysées sur la force et les changements de composition corporelle.

3. Adjonction d'enzymes digestives

La prévalence des enzymes digestives dans les produits de nutrition sportive a augmenté ces dernières années et on voit de nombreux produits contenant désormais une combinaison de protéases et lipases. Les protéases peuvent hydrolyser les protéines en diverses configurations peptidiques et potentiellement en acides aminés uniques, facilitant l'absorption.

Il semble que les capacités et la production d'enzymes digestives diminuent avec l'âge (69) rendant plus difficile la digestion d'un repas. L'adjonction d'enzymes digestives dans les produits de nutrition sportive pourrait potentiellement améliorer la digestion de ceux-ci et minimisent les différences de qualité entre différentes sources de protéines. (70)

Ainsi, les culturistes qui cherchent à augmenter les concentrations plasmatiques maximales d'acides aminés peuvent se tourner vers des sources de protéines hydrolysées ou de protéines enrichies en enzymes digestives. Cependant, aucune étude ne montre de supériorité en termes d'efficacité. Nous verrons dans le dernier chapitre, en quoi ces suppléments hydrolysés peuvent bénéficier d'un avantage à les consommer.

B. Les BCAA (Branched-Chain Amino Acid) ou acides aminés à chaines ramifiés ou acides aminés branchés

1. Introduction

Ils sont au nombre de 3 : leucine, isoleucine et valine et sont des acides aminés possédant des chaines ramifiées dans leur structure moléculaire. Ils ne représentent que 14 à 18% des acides aminés dans les muscles squelettiques et ce sont des suppléments très utilisés par les culturistes. (71)

Les BCAA sont fortement impliqués dans la régulation de la masse musculaire et se retrouvent dans l'alimentation et les protéines alimentaires.

Ces 3 acides aminés sont uniques dans leur rôle dans le métabolisme des protéines.

2. Métabolisme

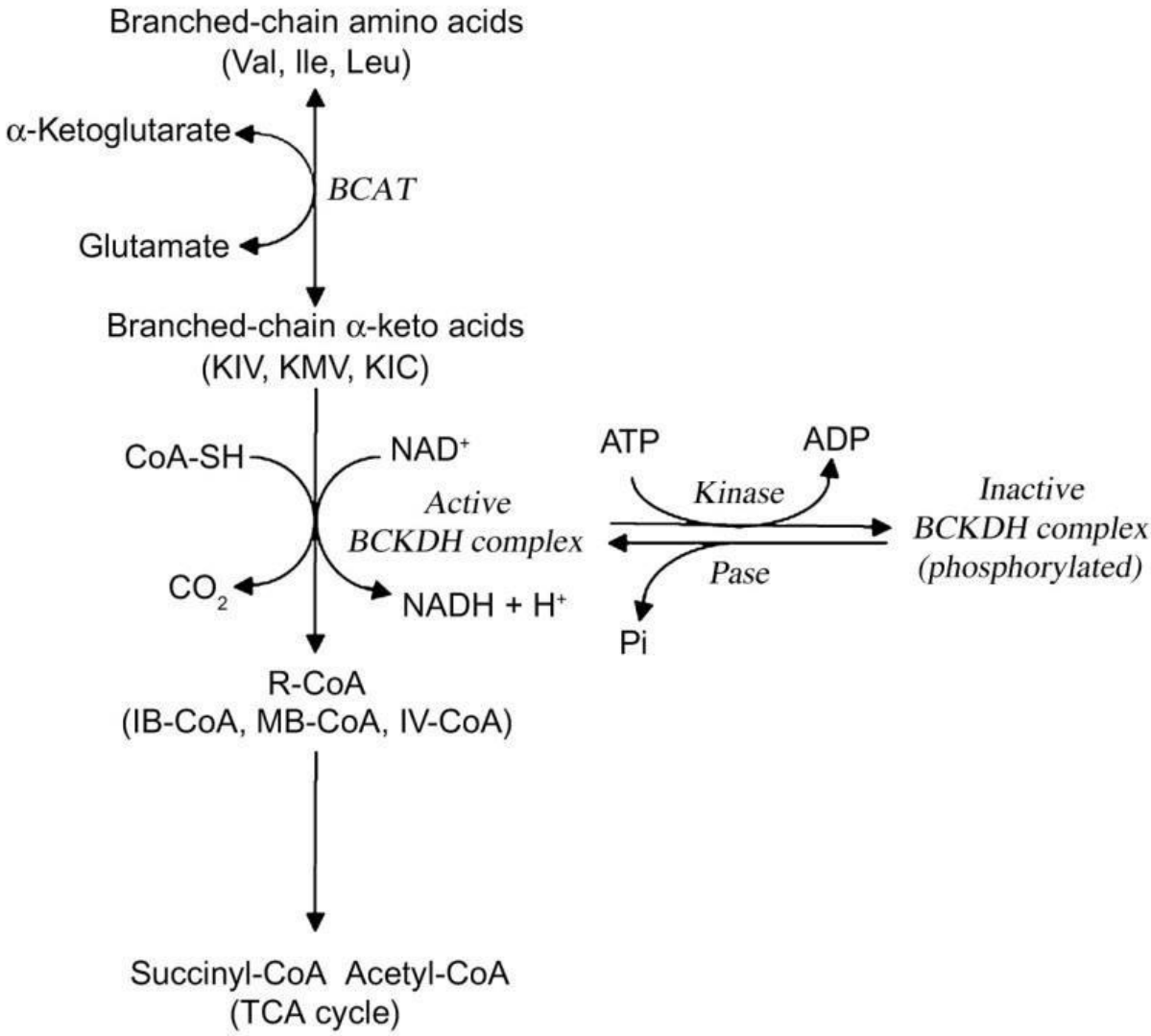


Figure 3 : Métabolisme des BCAA (72)

D'après le schéma ci-contre (cf Figure 3), on peut s'apercevoir que deux enzymes interviennent dans le métabolisme des BCAA :

- La BCAT : BCAA Transaminase
- La BCKDH : Branched-Chain α-Keto Dehydrogenase complex

Ces enzymes sont retrouvées en concentrations élevées dans les mitochondries des cellules des muscles squelettiques et en faibles concentrations dans le foie (73) (74). Cela permet d'affirmer que le catabolisme des BCAA se situe dans les muscles squelettiques, d'où une sensibilité particulière à l'exercice physique. (75)

Le complexe enzymatique BCKDH, lorsqu'il est activé par déphosphorylation, entraine donc l'oxydation des BCAA pour fournir de l'énergie à l'organisme. Ce complexe peut être activé de différentes manières :

- L'exercice physique et notamment la contraction musculaire localisée (76) favorise l'oxydation des BCAA pour fournir de l'énergie aux muscles.
- Les métabolites directs des BCAA, les α-cétoacides. Ils encouragent leur propre catabolisme permettant de former une boucle d'autorégulation. Donc en apportant plus de BCAA alimentaires par consommation plus élevée de protéines, cela augmentera le catabolisme des BCAA par formation accrue de métabolites et ce mécanisme est bien connu. (77)

Nous pouvons donc suggérer les besoins accrus en BCAA lors de la pratique d'une activité physique pluri-hebdomadaire tel que le culturisme. Cependant, tous les métabolites des BCAA, les α-cétoacides, inhibent la BCKDH kinase, activant ainsi la BCKDH donc le catabolisme des BCAA musculaires.

3. Absorption et lien avec la fatigue centrale

Les BCAA pénètre dans les cellules musculaires via un transporteur, la glycoprotéine CD98 (78) également responsable du transport du tryptophane et de la tyrosine. Il existerait donc une compétition au niveau de ce transporteur présents sur les cellules des muscles squelettiques mais également au niveau de la barrière hémato-encéphalique et intestinal.

Cette compétition au niveau du transport des BCAA avec des acides aminés aromatiques, tryptophane et tyrosine, au niveau de la barrière hémato-encéphalique, serait à l'origine de l'hypothèse selon laquelle les BCAA diminueraient la fatigue centrale pendant l'entrainement physique.

En effet, le tryptophane est l'acide aminé précurseur d'un neurotransmetteur impliqué dans la fatigue centrale et la sédation : la sérotonine. Des concentrations élevées de sérotonine dans le cerveau seraient associées à l'induction de la fatigue (79) et l'exercice physique augmente l'absorption du tryptophane (80) donc favorise

l'élévation de concentration de sérotonine dans le cerveau et provoque une fatigue centrale liée à l'exercice.

Pendant l'exercice, la balance acides aminés aromatiques/BCAA est en faveur des acides aminés aromatiques puisque les BCAA sont oxydés pour fournir de l'énergie. (81)

Ainsi, une supplémentation en BCAA avant et pendant l'entrainement permettrait d'entraver l'absorption du tryptophane, donc la production de sérotonine et donc de retarder l'apparition de la fatigue.

4. Action sur la synthèse des protéines musculaires

Les BCAA vont avoir leur rôle sur la synthèse des protéines musculaires via activation de la voie de signalisation mTOR (mammalian Target Of Rapamycin). La protéine mTOR est une sérine/thréonine kinase existant sous deux formes distinctes de complexes multiprotéiques : les complexes 1 et 2 de mTOR (respectivement mTORC1 et mTORC2).

mTORC1 est sensible à la rapamycine contrairement au complexe mTORC2. Même si mTORC2 intervient dans certains évènements régulateurs de la synthèse protéique, son implication est moins déterminante que celle de mTORC1. (82)

Parmi les 3 BCAA (leucine, isoleucine et valine), c'est la leucine qui semble induire le plus la synthèse des protéines musculaires. La leucine active mTORC1, qui à son tour active la sous-unité p70 de la kinase s6 (p70s6k) permettant d'augmenter la traduction et la biogenèse ribosomale des protéines musculaires. (83)

Vient ensuite l'isoleucine, intermédiaire au niveau de sa capacité à induire la synthèse protéique puis enfin la valine qui est le BCAA le moins à même de stimuler la synthèse des protéines musculaires.

On peut ajouter à cela que la période après l'exercice physique de résistance, dans un délai de 1 à 2h, active également la voie mTOR pour la synthèse des protéines musculaires (84).

C'est ainsi que l'on peut conclure que la consommation de BCAA associé à de l'exercice physique de résistance permettrait une augmentation conséquente de la synthèse des protéines musculaires.

5. Action sur l'absorption intracellulaire du glucose

L'absorption intracellulaire de glucose dans les cellules musculaires est médiée par différentes voies de signalisation moléculaires ayant pour but la formation de GLUT-4, migrant vers la membrane cellulaire pour capter le glucose et responsable de son transport à l'intérieur de la cellule.

Les différentes voies de signalisation (cf Figure 4) sont :

- La voie PI3k (Phosphatidyl Inositol 3-kinase) activant l'Akt ou protéine kinase C (PKC) propre au récepteur à l'insuline
- La voie de l'AMP cyclique
- La contraction musculaire via le gradient calcique

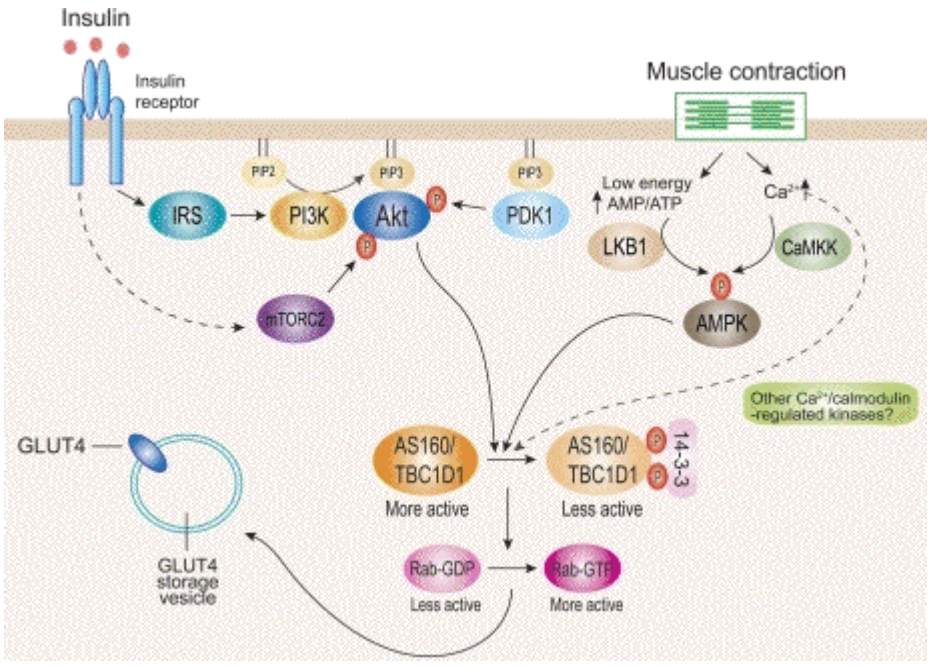


Figure 4 : Les différentes voies de signalisation pour l'absorption du glucose intracellulaire. (85)

Les BCAA vont interagir avec ces différentes voies de signalisation donc chacun aura des spécificités.

La leucine agit de différentes manières sur l'absorption du glucose :

- Via la voie PI3k/PKC et via une augmentation de la sécrétion d'insuline (86) qui aura pour effet d'augmenter l'absorption du glucose intracellulaire
- Via la voie mTORC1 agissant en inhibant la signalisation de l'AMP cyclique donc qui aura pour effet de diminuer l'absorption de glucose intracellulaire.
- La leucine serait donc capable d'entraver sa propre efficacité sur l'absorption cellulaire de glucose via la signalisation mTOR.

Concernant l'isoleucine, elle agit sur l'absorption du glucose :

- Via la voie PI3k/PKC comme la leucine mais l'isoleucine n'est pas aussi efficace pour activer la voie de signalisation mTOR in-vitro (87) donc sa propriété à augmenter l'absorption du glucose intracellulaire ne se supprime pas d'elle-même.
- L'isoleucine est connue pour favoriser l'absorption musculaire de glucose montrant ainsi des effets hypoglycémiants dans les études chez le rat. (88)

Concernant la valine, elle est moins étudiée mais a montré un effet inhibiteur sur l'absorption du glucose plus rapide que la leucine (87).

Concernant les réserves de glycogène musculaire, la supplémentation, chez le rat, en BCAA préserve ces réserves en glycogène des muscles squelettiques et du foie après une période d'exercice aigu par rapport à un placebo. (89)(90)

C. L'hydroxyméthylbutyrate (HMB) : un des métabolites de la leucine

1. Métabolisme de la leucine

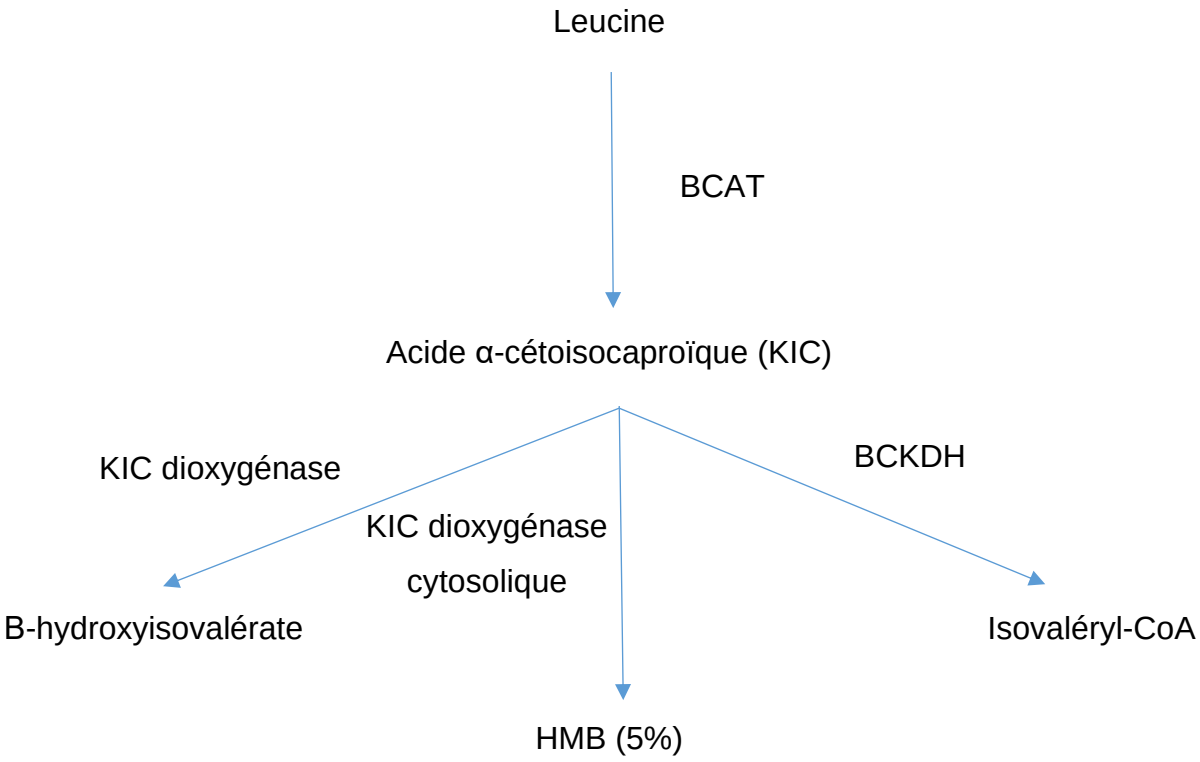


Figure 5 : Métabolisme de la leucine

Comme vu ci-dessus, l'unique source de HMB dans le corps est la leucine (cf Figure 5). L'oxydation de la leucine en HMB ne représente que 5% de son métabolisme.

2. Mécanisme d'action et propriétés du HMB

Le HMB est un métabolite naturel et est à son tour métabolisé en hydroxyméthylglutarylCoA qui est un facteur limitant de la biosynthèse du cholestérol.

Le HMB agit comme la leucine au niveau de la synthèse protéique, c'est-à-dire par activation de la voie de signalisation mTOR (91) et peut se produire indépendamment de la leucine. (92)

Cependant, le HMB est étudié et mieux connu comme un métabolite ayant des propriétés anti-cataboliques, confirmé par des études in-vitro (93)(94), via l'activation de différentes voies de signalisation anti-apoptotique (95)(96) et effet mitogène dans la différenciation des cellules satellites (92).

C’est d’ailleurs pour cet effet anti-apoptotique que le HMB est particulièrement efficace et étudié dans les populations cataboliques telles que les personnes âgées et les patients atteints de maladies chroniques (97).

D. La glutamine

C’est l’acide aminé non essentiel le plus abondant dans le muscle et couramment consommé comme complément alimentaire. La glutamine se trouve en grande quantité dans les produits carnés et les œufs ainsi que dans les protéines de lactosérum et la caséine.

La glutamine est le carburant principal des entérocytes et des leucocytes (98), préférée au glucose puisque source d’énergie plus rapidement mobilisable. Les leucocytes sont donc dépendants de la glutamine provenant d’autres tissus (possédant la glutamine synthétase notamment le tissu musculaire) ou de l’apport alimentaire. Pour cette raison, la glutamine et son utilisation en tant que complément alimentaire ont tendance à être réservée aux situations où la synthèse de glutamine doit être augmentée comme lors de maladie grave nécessitant réaction du système immunitaire accrue, exercice cardiovasculaire prolongé ou situation de stress intense. (99)

Puisque le muscle squelettique possède une grande quantité de glutamine, il présente un risque plus élevé de catabolisme en période de maladie. (100)

Ci-dessous (cf Figure 6), nous pouvons constater que la glutamine, en dehors de l’apport alimentaire, peut être synthétisé de Novo dans le muscle à partir du métabolisme des BCAA.

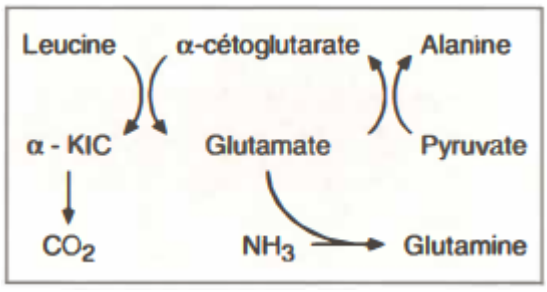


Figure 6 : Biosynthèse de Novo de la glutamine (101)

Ainsi, on pourrait suggérer que la supplémentation en glutamine permettrait de préserver la leucine de l'oxydation massive dans certaines conditions métaboliques requérant un besoin accru en glutamine (102) donc permettrait de prolonger les effets de la leucine sur la synthèse protéique.

La glutamine est également associée à de nombreux rôles métaboliques (103) :

- Transport d'azote entre les tissus avec l'alanine
- Précurseur de glutathion antioxydant
- Précurseur de nucléotides
- Régulation du métabolisme acide-base
- Substrat pour la néoglucogenèse
- Substrat dans la production de L-citrulline et de L-glycine (104)

4. Les produits pour sportifs destinés à augmenter les performances physiques

A. Les précurseurs d'oxyde nitrique (NO)

Le NO ou oxyde nitrique est une molécule connue pour être vasodilatatrice et améliorer le flux sanguin, utilisés dans la médecine dans les populations hypertensives et dans les dysfonctionnements érectiles. Cependant, les suppléments de NO sont utilisés chez les culturistes pour différentes raisons (que nous allons approfondir dans la dernière partie) :

- Permettre un meilleur flux sanguin dans les muscles pendant un entrainement, donc permettrait une sensation de congestion musculaire accrue, un afflux de nutriments aux muscles augmenté pendant l'entrainement
- Baisse de fatigue perçue par un exercice intense donc d'améliorer l'endurance pour l'exercice aérobie et anaérobie et les performances physiques
- Augmentation de la synthèse protéique

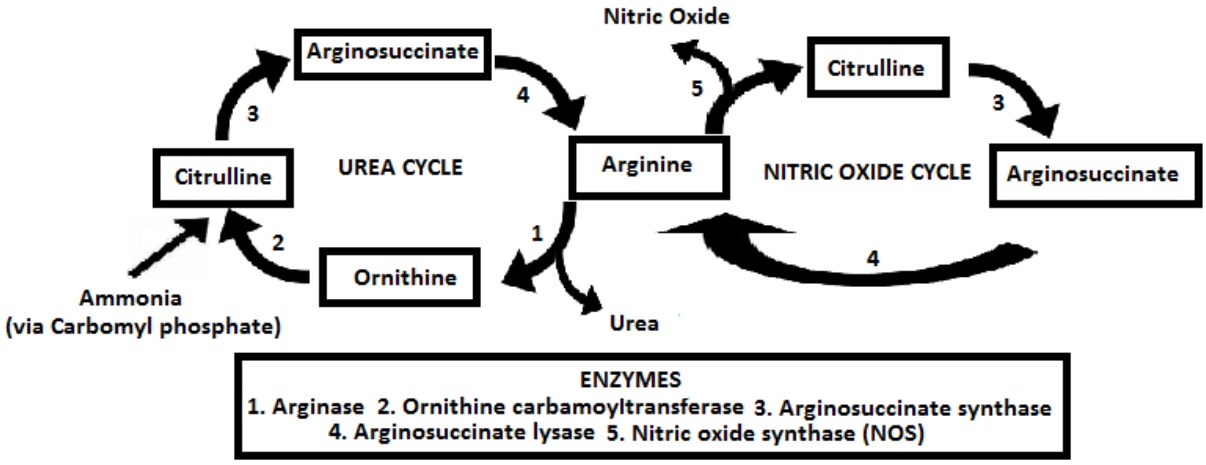


Figure 7 : cycle de l'urée en lien avec le cycle de l'oxyde nitrique (105)

1. La L-arginine

L'arginine est un acide aminé conditionnellement ou semi-essentiel présent dans l'alimentation. En effet, son homéostasie est quelques peu maintenue après une privation alimentaire prolongée. (106)

Au niveau de sa biodisponibilité dans l'organisme, l'arginine possède une absorption intestinale faible et est utilisée de façon importante par le foie. Au plus les doses d'arginine sont élevées, au plus la biodisponibilité est moindre (107) : une étude (108) a expérimenté plusieurs doses orales d'arginine comparées à un placebo chez des volontaires et ont obtenu les résultats suivants :

- 5g d'arginine à jeun ont été capable d'augmenter l'aire sous la courbe (ASC) de l'arginine (pendant 5h) de 40%
- 9g d'arginine ont été capable d'augmenter encore l'ASC de 181%
- 13g d'arginine n'a pas augmenter les taux sériques de manière significative en plus de provoquer des troubles intestinaux.

Concernant les actions supposées des suppléments de NO, il existe peu de preuves scientifiques. En effet, les études ne démontrent pas de différence significative de l'action sur le flux sanguin musculaire d'une prise de L-arginine comparé à un placebo. (109)(110)

Un nombre important d'études ne montre aucun gain de performances ou d'endurance avec une supplémentation en L-arginine (111)(112)(113)(114) y compris sur la synthèse protéique (115).

2. La citrulline

1. La L-citrulline

La citrulline est l'un des 3 acides aminés du cycle de l'urée (cf Figure 7), avec l'arginine et l'ornithine mais intervient surtout dans ce qui va nous intéresser, le cycle de l'oxyde nitrique. C'est un acide aminé non protéinogène, c'est-à-dire qu'il n'est pas utilisé pour la formation de protéines. Il n'est pas présent en grande quantité dans toutes les protéines mais se retrouve surtout dans la pastèque (Citrullus lanatus à partir de laquelle a été identifié la citrulline, d'où son nom) et dans le melon, courge, concombre, citrouille. (116)

Au niveau de sa biosynthèse, la citrulline provient :

- Pour 10%, du recyclage de l'arginine (cf figure 7)
- Pour 90%, la citrulline est produite à partir de l'azote contenu dans la glutamine (117). La glutamine est donneuse d'une molécule azotée dans la réaction enzymatique de l'ornithine transcarbamylase qui utilise l'ornithine et le phosphate de carbamoyle pour produire de la citrulline dans les entérocytes. (118)

Concernant l'absorption intestinale, la citrulline est nettement supérieure à l'arginine et médié par un transporteur sodium-dépendant. (119) Ce qui en fait une bien meilleure source d'arginine que l'arginine elle-même. Une étude (120) a mesuré les élévations sériques d'arginine, ornithine et citrulline après ingestion orale de 6g de citrulline associée à un exercice physique et ont observé :

- Augmentation de 173% de citrulline plasmatique
- Augmentation de 152% de l'ornithine plasmatique
- Augmentation de 123% de l'arginine plasmatique

Puis ont enregistré une normalisation des valeurs après 3h de repos.

Ainsi, la supplémentation orale en citrulline permet d'augmenter les acides aminés du cycle de l'urée et du NO plasmatique notamment la citrulline elle-même, l'ornithine et l'arginine.

Concernant son élimination rénale, 83% de la dose ingérée subit une réabsorption rénale dans les tubules proximaux pour être convertie en arginine via l'arginosuccinate synthase et arginosuccinate lyase. (121)(122)

La citrulline est connue pour exercer un effet tampon dans la cellule. En effet, elle possède des propriétés de tampon acide de l'ammoniac dans nos cellules. (123) L'ammoniac (et augmentation de l'acidité en général) signale la fatigue musculaire lorsqu'elle s'accumule par inhibition de conversion du pyruvate en AcetylCoA (mécanisme également responsable de la production d'acide lactique) et entrave la contractilité des cellules musculaires.
De ce fait, secondairement à la prévention de l'accumulation d'ammoniac dans les cellules musculaires, on peut observer des gains en performances via une endurance musculaire accrue et une diminution de la douleur ressentie à l'effort. Une étude a observé le phénomène chez des haltérophiles, avec une augmentation du nombre de répétition (124). Cependant, une autre étude a des résultats contradictoires avec une diminution du temps jusqu'à épuisement sur une épreuve de marché sur tapis incliné et une augmentation de l'effort perçu. (125)

2. Malate de citrulline

Une version de citrulline est plus particulièrement étudiée sur les sportifs, c'est le malate de citrulline qui exerce un double pouvoir tampon :

- La citrulline comme tampon ammoniacal de la cellule
- Le malate est un intermédiaire du cycle tricarboxylique qui peut diminuer l'accumulation de l'acide lactique

Plusieurs études montrent un avantage dans les performances physiques lors de la supplémentation en malate de citrulline :

- Une étude montre que la supplémentation en malate de citrulline pendant 15 jours augmente de 34% la production d'ATP pendant l'exercice, augmente la

vitesse de récupération de phosphocréatine après un exercice de 20% et diminue la perception de fatigue. (126)

- Une autre étude montre que 8g de malate de citrulline, lors d'une séance de musculation isolant les muscles pectoraux, augmente le nombre de répétition effectuées d'environ 53% et diminue les douleurs survenant 24 à 48h après l'entrainement (liées aux microlésions du tissu musculaire) de 40% (124)

Le malate de citrulline semble agir sur des efforts en anaérobies (comme les exercices de résistance) plutôt que sur les efforts aérobies de longue durée, comme nous le montre une étude faite sur des cyclistes lors d'une étape de 137km où le malate de citrulline est comparé à un placebo. (127)

3. L-citrulline associée au glutathion

La prise de glutathion réduit (GSH) associé à de la L-citrulline a été étudié chez des hommes entrainés en résistance pendant 7 jours. Les niveaux de nitrite et d'oxyde nitrique étaient significativement plus élevés 30 minutes après l'exercice par rapport au placebo ou à la L-citrulline seule. (128)

Ainsi, la supplémentation avec de la L-citrulline associée au glutathion peut prolonger la demi-vie du NO, entrainant potentiellement une vasodilatation plus importante que la L-citrulline seule.

Il n'existe cependant pas d'étude sur le gain de performances physiques ou sur la synthèse protéique avec cette supplémentation.

3. La bêta-alanine et carnosine

La β-alanine, une fois consommée, est absorbée par le muscle squelettique pour être utilisée dans la synthèse de carnosine musculaire. La carnosine est un dipetptide composé de β-alanine et d'histidine = β-alanyl-L-histidine.

La carnosine est connue pour être un tampon pH, maintenant l'équilibre acido-basique, important lors de l'exercice anaérobie tel que l'haltérophilie entre autres. La carnosine

est stockée puis libérée en réponse à une diminution du pH intracellulaire donc lors d'une acidification intracellulaire (régime cétogène, acide lactique induit par l'exercice). La carnosine contribue au tamponnage intracellulaire en raison de la structure imidazolée de son résidu histidine (129)

On peut donc retrouver de la β-alanine et de la carnosine dans les produits carnés et la quantité dépendra de l'acidose métabolique à laquelle l'animal a été soumis (sauvage > élevage). (130)

Au niveau de l'organisme, la synthèse de Novo de carnosine à partir de β-alanine fait intervenir une enzyme, l'ATPGD1 (ATP-Grasp-Domain-containing protéin 1). (131)

Une étude a montré que les culturistes pouvaient stocker 2 fois plus de carnosine musculaire que des personnes sédentaires (132). Cependant, ces différences chez des personnes non supplémentées peuvent être dues à des différences d'apports alimentaires ou à des adaptations au long terme (éventuellement dans la synthèse hépatique de β-alanine). (133)

Chez les végétariens, on peut observer une diminution des apports d'histidine et des diminutions d'apports de carnosine mais ne justifie pas le fait de devoir se supplémenter.

Le foie possède des carnosinases, capables de métaboliser la carnosine ingérée et fournir de la β-alanine aux tissus musculaires. La carnosine ingérée semble être rapidement hydrolysée (130) donc il serait préférable de se supplémenter en β-alanine plutôt qu'en carnosine.

B. La créatine

1. Sources

La créatine est une molécule résultant d'un assemblage de plusieurs acides aminés, c'est un polypeptide composé de L-arginine, de glycine et de méthionine (cf figure 8).

La créatine se retrouve dans l'alimentation, source exogène, notamment dans les produits carnés et les poissons. La créatine alimentaire est cependant digérée plus lentement que si prise en supplémentation, mais la biodisponibilité reste identique. (134)

Dans l'organisme, il existe une synthèse endogène de créatine qui se déroule dans le foie en grande partie puis très peu dans le rein et le pancréas.

La créatine est stockée sous forme de phosphocréatine dans les muscles squelettiques et cardiaques et agit comme source d'énergie. (135) La capacité de stockage de la créatine est limitée, bien qu'elle augmente à mesure que la masse musculaire augmente (136). L'augmentation des apports en créatine augmente les réserves d'énergie cellulaire, favorisant la régénération de l'ATP à court terme tandis que le glucose et les acides gras sont stockés pour permettre la reconstitution de l'ATP sur des durées plus longues.

2. Pharmacologie

1. Biosynthèse

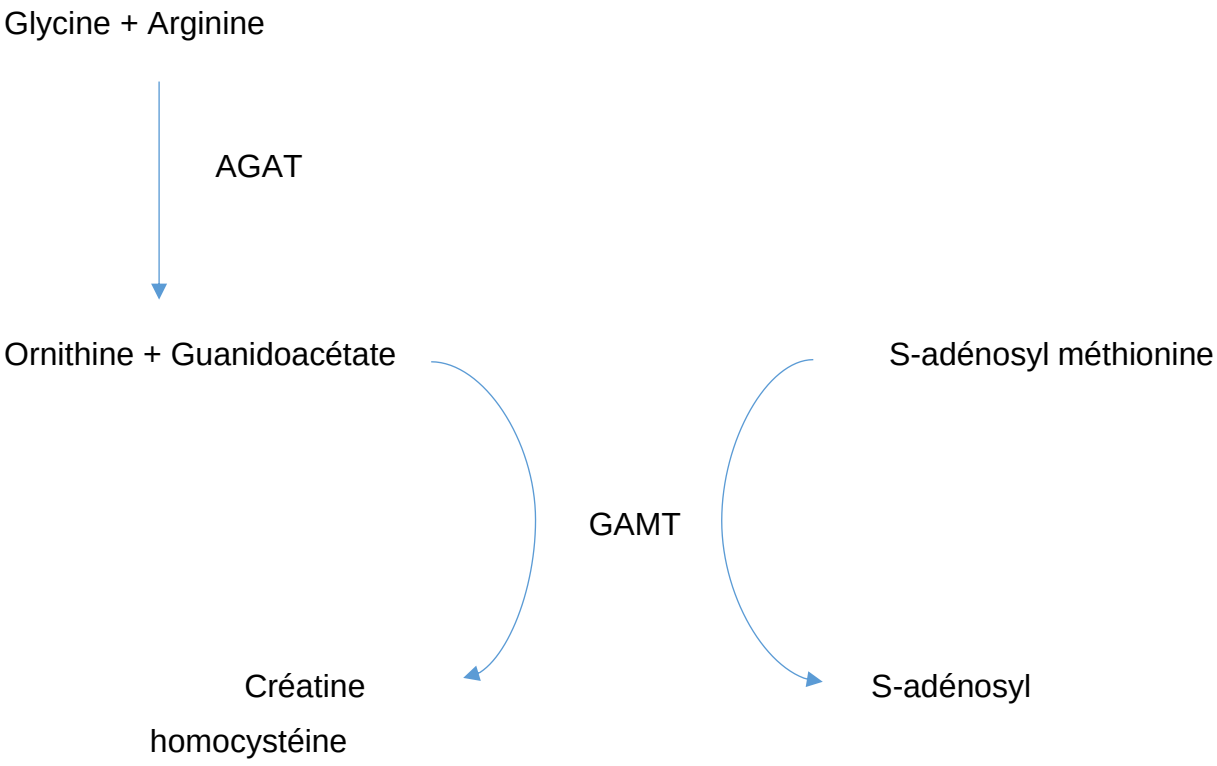


Figure 8 : Biosynthèse de la créatine

Une consommation excessive de créatine peut supprimer l'activité de l'enzyme AGAT et donc diminuer la synthèse de créatine.

2. Absorption

La biodisponibilité par voie orale de la créatine fluctue entre 80 et 100% de la dose ingérée. En effet, aux doses de 5g, la biodisponibilité de la créatine s'élève à 99% mais à doses plus élevées, il est observé un effet de saturation de l'absorption intestinale. (137)

3. Cinétique

La créatine suit une cinétique dose-dépendante. Un apport de 5g de créatine en supplémentation optimale serait la dose optimale pour maximiser le taux d'accumulation de créatine dans les cellules musculaires. (138)

3. Mécanismes d'action

1. Sur la puissance

L'énergie provenant de la dégradation des macronutriments (glucides, lipides, protéines) est stockée sous forme d'adénosine triphosphate (ATP) dans les cellules, principale vecteur d'énergie dans notre organisme.

La créatine permet le stockage des groupements phosphore à haute énergie sous forme de phosphocréatine, permettant la régénération de l'ADP pour former l'ATP.

En augmentant le pool de phosphocréatine cellulaire par supplémentation en créatine, on peut accélérer la régénération de l'ADP en ATP. Etant donné que l'ATP s'épuise rapidement lors d'efforts musculaires intenses, un des principaux avantages de la supplémentation en créatine est sa capacité à régénérer les réserves d'ATP plus rapidement, ce qui peut favoriser l'augmentation de la force et puissance délivrée pendant l'exercice.

Plus un muscle contient de l'ATP par rapport à de l'ADP, plus sa contractilité est élevée donc plus il sera puissant in-vivo (139).

2. Sur l'hypertrophie musculaire

Une supplémentation orale de créatine peut augmenter la taille des fibres musculaires indépendamment de la synthèse protéique puisqu'elle augmente la teneur en eau dans les cellules musculaires. (140)
L'afflux d'eau intracellulaire permet également de diminuer le taux d'oxydation des protéines musculaires et augmenter le bilan azoté. Ce qui a pour conséquence d'augmenter indirectement la masse musculaire. (141) Cette diminution de l'oxydation des protéines musculaires causée par le gonflement des cellules est due à des changements dans la signalisation concernant le recrutement des cellules satellites et l'augmentation de l'expression des protéines de signalisation de l'hypertrophie musculaire.

4. Différentes formulations sur le marché

Il existe, sur le marché et en cours de recherches, de nombreuses formes et formulations de créatine destinées à augmenter son absorption, augmenter ses effets ou autre propriété. Cependant, de nombreuses études sont faites et ne sont que peu concluantes concernant les nouvelles formulations.

La forme la plus courante, étudiée et comparée, est la créatine monohydrate.

1. La créatine monohydrate

Il existe deux formulations de créatine monohydrate :

- La forme anhydre (sans monohydrate) qui se transforme en créatine monohydrate dans un environnement aqueux. Cette formulation permet de concentrer plus de créatine dans une gélule.
- La forme micronisée ou « créatine micronisée » qui permet de diminuer la taille des particules par processus mécanique et augmenter la solubilité de la créatine monohydrate dans l'eau.

La créatine monohydrate est la forme de référence dans les études de comparaison entre les formes et formulations et reste néanmoins la plus efficace et la moins coûteuse donc la plus utilisée.

2. Créatine kré-alkalyn

Cette formulation améliorerait les effets de la créatine monohydrate en raison du pH élevé de l'estomac. Elle permettrait une meilleure absorption dans les cellules et une plus grande accumulation dans les cellules musculaires.

Cependant :

- Non démontré scientifiquement pour le moment
- Une étude a comparé la créatine monohydrate et la créatine kré-alkalyn sur 36 sujets entrainés en résistance et ne note aucune différence (142)
- Aucune différence dans les effets secondaires

La créatine kré-alkalyn est considérée comme une créatine tamponnée. C'est-à-dire qu'elle serait facilement neutralisée dans l'estomac à cause du pH élevé donc des industriels ont essayé des enrobages gastro-résistant mais encore une fois, aucune étude ne démontre un quelconque avantage de la créatine kré-alkalyn par rapport à la créatine monohydrate.

3. Créatine ester-éthylique

Elle augmente à moindre degré le niveau musculaire de créatine. (142). Cependant, elle entraine une augmentation des concentrations sériques en raison de la conversion de l'ester-éthylique de créatine en créatinine par des moyens non enzymatiques (143).

A doses égales, la créatine ester-éthylique n'a pas démontré une augmentation du gonflement cellulaire après 28 jours de supplémentation orale par rapport à la créatine monohydrate. On en déduit donc que cette forme de créatine n'est pas plus efficace que la créatine monohydrate mais serait une piste actuellement à l'étude pour son potentiel en tant que traitement des déficits en transporteur de créatine.

4. Autres formes

Il existe de nombreuses formes et formulations de créatine soit peu étudiées, soit ne démontrant aucune efficacité supplémentaire par rapport à la créatine monohydrate. Nous allons lister quelques formes et formulations :

- Chlorhydrate de créatine : supposée nécessiter des doses orales plus faibles mais non démontré et semble peu probable.
- Créatine sous forme liquide : inférieure à la créatine monohydrate en terme d'efficacité (144) puisque des problèmes de stabilité et on constate des problèmes de durée de conservation limitée.
- Créatine chélatée avec du magnésium : efficacité identique à la créatine monohydrate
- Nitrate de créatine : efficacité identique à la créatine monohydrate malgré une meilleure solubilité dans l'eau
- Citrate de créatine : efficacité identique à la créatine monohydrate
- Cyclocréatine : analogue synthétique de la créatine sous forme cyclique. C'est un analogue mimétique de la créatine et substrat de la créatine kinase. Elle possède une structure planaire qui facilite sa diffusion à travers la membrane cytoplasmique. Cependant, d'après les études, elle semble avoir une moins bonne affinité que la créatine monohydrate pour la créatine kinase et aucune étude n'a été faite sur des sujets en bonne santé. Elle ne pourrait être bénéfique que dans le cas d'anomalies au niveau du transporteur de créatine.

C. Les glucides

L'apport complémentaire de glucides à l'alimentation est destiné aux sportifs pour la régénération plus rapide d'ATP, source d'énergie principale durant les exercices intenses et répétés tel que pratiqués dans le culturisme.

Cependant, il existe différentes catégories de glucides classés selon leur index glycémique et leur charge glycémique. Ce sont des mesures permettant de quantifier le niveau d'augmentation de la glycémie suite à une prise orale.

- L'index glycémique est calculé à partir de la zone incrémentale sous la courbe de glucose plasmatique post-prandiale d'un aliment test comparé à celui suivant la consommation d'une quantité égale de glucose ou de pain blanc exprimé en pourcentage de la norme.

- La charge glycémique est calculée en multipliant l'index glycémique par quantité de glucides disponibles dans une portion de nourriture donnée.

1. Maltodextrine

Disponible en poudre utilisé le plus fréquemment en tant qu'épaississant des laits infantiles par les particuliers et comme agent de texture ou de conservation par les industriels.

Sur le plan chimique, la maltodextrine est un composé soluble de maltose et de dextrine.

- Le maltose est un sucre constitué de deux molécules de glucose et est extrait de l'amidon de malt.
- La dextrine est une substance gommeuse qui résulte de la transformation de l'amidon ou de la fécule, par hydrolyse ou par chauffage à sec, avec éventuellement addition de petites quantités de réactifs chimiques. (145)

La maltodextrine est intéressante pour deux raisons :

- C'est une source de glucose rapidement assimilable donc disponible pour l'organisme permettant de reconstituer rapidement les stocks d'ATP. Autrement dit, c'est un glucide d'action rapide, avec un index glycémique haut.
- Elle limite le risque de déshydratation lié à l'exercice car demande moins d'eau pour sa digestion que les autres glucides. De ce fait, elle pourrait limiter l'apparition précoce de la fatigue par déshydratation.

Il existe de nombreuses boissons d'effort à base de maltodextrine destinées aux pratiquants de sport à haute intensité. Il existe également la maltodextrine seul utilisée pour l'épaississement des laits infantiles mais peut être utilisée par un sportif, à incorporer directement dans une bouteille d'eau.

La maltodextrine sert de référence pour comparer différents types de glucides et leur impact sur l'exercice physique.

2. D-ribose

Le D-ribose est un sucre pentose (structure chimique cyclique composée de 5 atomes de carbone) produit par l'organisme et se lie à divers acides nucléiques. Lorsque lié aux acides nucléiques, le complexe peut ainsi agir de deux manières, soit comme intermédiaires énergétiques (donneur de NADH, FADH et ATP) soit comme base structurelle de l'ADN et de l'ARN.

Le ribose, plus particulièrement le ribose-5-phosphate, est un intermédiaire de la voie des pentoses phosphates. Lorsque la cellule est en demande d'énergie, la voie des pentoses phosphates aboutit à la conversion de glycéraldéhyde-3-phosphate et de de fructose-6-phosphate en pyruvate par glycolyse et permet la formation d'ATP.

Une étude réalisée sur des cyclistes (sprints), entrainés de manière intensive et intermittente, a montré qu'une supplémentation orale à haute dose de D-ribose augmentait le taux de reconstitution de l'ATP, effet mesuré 3 jours après l'effort, par rapport à une supplémentation en maltodextrine. (146)

Dans cette même étude, une dose orale de D-ribose (200 mg/Kg) est comparé à une même dose orale de maltodextrine, toutes deux associées à du saccharose en quantité identique. Cette fois-ci, les résultats portent sur le glucose sérique après ingestion et sur la restauration du glycogène. On voit ainsi que le D-ribose augmente moins le glucose sérique que la maltodextrine et semble équivalent quant à la restauration du glycogène après effort.

D'après cette étude, on peut donc conclure que le D-ribose à haute dose est plus efficace que la maltodextrine pour restaurer les stocks d'ATP à moyen terme. Cependant, nous verrons donc dans la dernière partie que ces deux compléments n'ont pas vraiment la même indication.

3. Palatinose

Considéré comme un glucide à faible index glycémique, le palatinose est un nom de marque correspondant à l'isomaltulose. C'est un dissaccharide (association de

glucose et fructose) d'origine naturelle produit industriellement à partir du saccharose du sucre de betterave.

C'est un glucide lent mais entièrement digestible avec un faible index glycémique (IG = 9). Il est donc entièrement disponible et assure une libération prolongée de glucose. Cette caractéristique est due à sa liaison glycosidique α1-6, digéré plus lentement que le saccharose, expliquant ainsi les augmentations faibles et plus lentes de la glycémie après absorption. (147)

Il est utilisé dans l'alimentation et les boissons comme ingrédient alimentaire et peut remplacer d'autres sucres et maltodextrines. On en retrouve typiquement dans les boissons de l'effort et énergisantes. (147)

Le palatinose est classé comme « généralement reconnu comme sûr » (GRAS) aux Etats-Unis et approuvé par la suite d'une évaluation de sécurité avant commercialisation en tant qu'ingrédient alimentaire en vertu de la réglementation sur les niveaux alimentaires dans l'union européenne en 2005. (148)

C'est le seul glucide de type sucre qui résiste à la fermentation, c'est-à-dire qu'il possède un faible pouvoir cariogène (148). L'approbation de l'allégation de santé correspondante dans l'UE est prévue à l'annexe du règlement CE 432/2012.

Ainsi, l'isomaltulose est bénéfique pour les efforts d'endurance. En effet, une étude a comparé l'effet de l'isomaltulose sur des cyclistes pratiquant une épreuve de contre-la-montre. Dans cette étude, l'isomaltulose a été comparée à de la maltodextrine (IG élevé) et en résulte un profil glycémique plus stable et une oxydation des graisses plus élevée chez les cyclistes ayant consommé de l'isomaltulose. Ces résultats sont expliqués par les propriétés de libération lente et de faible index glycémique de l'isomaltulose permettant de se fier à une plus grande oxydation des graisses et à un glycogène de rechange pendant la période d'exercice.

Dans la dernière partie de cette thèse, nous allons traiter brièvement l'aspect diététique, base primordiale du culturiste. Ce sera dans cette partie que nous verrons l'importance de la consommation de glucides à index glycémique bas.

5. Les produits pour sportifs destinés à la perte de masse grasse

A. Produits à base de caféine

Les compléments alimentaires les plus utilisés par les culturistes sont les stimulants, en particulier la caféine et les compléments alimentaires ou produits pour sportifs contenant de la caféine.

En plus d'augmenter l'excitation, la caféine peut diminuer la douleur à l'effort perçue pendant l'exercice (149) et améliorer la manipulation cellulaire de calcium, ce qui peut augmenter la puissance délivrée pendant l'effort (150). Ainsi, la caféine permet de réduire la fatigue et augmenterait la force. Certaines études ne décèlent pas d'effet ergogénique de la caféine sur les exercices en résistance (151). Les effets ergogéniques de la caféine observés dans certaines études sont dus aux dose élevée (5 à 6 mg/Kg) de caféine, se situant à la limite supérieure de ce qui est considéré comme dose sure.

B. La L-carnitine

1. Sources

La L-carnitine est un composé produit dans l'organisme à partir de lysine et de méthionine. Cette synthèse est effectuée par des enzymes dépendantes de la vitamine C, donc un état de carence en vitamine C peut altérer la biosynthèse de la L-carnitine. Ce composé peut être acétylé pour devenir de l'acétyl-L-carnitine (ALCAR) permettant de traverser plus efficacement la barrière hémato-encéphalique (BHE).

La L-carnitine se retrouve dans le produits carnés (majoritairement dans le bœuf) et en moindre mesure dans le lait (152).

2. Pharmacologie

L’absorption de la L-carnitine et de l’ALCAR se fait au niveau intestinal par le transporteur OCTN2. (153) Le muscle squelettique est le plus grand réservoir de L-carnitine puisque correspond à 98% des réserves corporelles. (154)
La L-carnitine, dans l’organisme, peut avoir différent devenir :

- Etre métabolisée par le foie en triéthylamine et éliminé par le rein ou subissant une réabsorption tubulaire.
- Etre métabolisée en γ-butyrobetaine et métabolite excrétée par voie fécale.
- Subir un cycle entéro-hépatique (155)

La L-carnitine est connue pour se lier aux acides gras à longues chaines leur permettant de pénétrer dans les mitochondries pour y être oxydés, mécanisme de combustion des graisses.

3. Différentes formulations et variantes

L’ALCAR a tendance à être considérée comme la version neurologique de la carnitine et semble avoir plus d’interaction dans le cerveau par rapport à la L-carnitine. Ainsi, elle possèderait un effet sur la fatigue mentale chronique (156) et permettrait donc d’améliorer les performances cognitives.

La GPLC (glycopropinoyl-L-carnitine) qui est l’association de la L-carnitine à la glycine estérifiée en un acide gras à courte chaine. Lorsque le propinoyl-L-carnitine atteint la mitochondrie, il est métabolisé en L-carnitine et propionyl CoA (157). C’est une formulation particulière qui permettrait d’augmenter le flux et la pression sanguine (158) et utiliser par les sportifs pour sa caractéristique à augmenter la production de NO (159).

La LCLT (L-Carnitine-L-Tartrate) possédant un pic d’absorption plus rapide mais aucun effet supérieur à la L-carnitine. Cependant, ce composé est fréquemment utilisé dans les études sportives puisque rapidement absorbé coïncidant avec l’activité physique lorsque pris auparavant. (160)

4. Indications

1. Sur la masse grasse

La carnitine possède un mécanisme d'action qui, théoriquement, permettrait l'augmentation de perte de masse grasse si prise en complément de l'alimentation. Cependant, on se rend compte que les études ne semblent pas aller dans ce sens. En effet, aucune effet significatif n'a été trouvé chez le rat (161)(162) ou chez la femme obèse avec une supplémentation de 2g/j avec une activité aérobie. (163)

Seul cas contraire où l'on trouve une augmentation de la perte de graisse est lors d'états de carence en carnitine, observé chez les vegans, végétariens, personnes âgées ou maladies métaboliques.

2. Sur la récupération

Une autre approche de la carnitine est étudiée chez les sportifs, c'est celle de la récupération. En effet, des études montrent qu'avec une supplémentation en carnitine, les marqueurs de dommages musculaires (marqueurs métaboliques des purines et protéines tels que la créatine kinase, myoglobine, protéine de liaison aux acides gras) sont diminués. Ce qui impliquerait un plus grand volume de travail avec une supplémentation orale de carnitine.

Ces résultats ont été trouvés avec une supplémentation orale de 2g de LCLT pendant 3 semaines chez des hommes entrainés en résistance (164)(165) et également avec une supplémentation orale de L-carnitine. Une des explications potentielles à ces résultats est que la carnitine améliore l'oxygénation des muscle (166) par augmentation des niveaux de NO indépendamment de l'exercice donc améliorerait la récupération lors d'exercice en anaérobie (condition hypoxique).

Cependant, une étude a cherché si ces diminutions de marqueurs de dommages musculaires affectaient le temps de récupération des sportifs. Pour cela, 2g de supplémentation orale de L-carnitine ont été comparé à un placebo et aucune différence n'a été trouvé lorsque 2 séances de cardio anaérobie était séparées de 3h (167).

Dans une autre étude, des sujets sont soit supplémentés en L-carnitine à 3 g/j pendant 7 jours soit supplémentés en placebo et réalisent une épreuve physique, les laissant dans un état de déplétion en glycogène. Cette étude ne trouve aucune différence sur les taux de fatigue et d'oxydation des graisses.

3. Sur les performances

Une étude récente consistait a comparé sur 23 hommes, une supplémentation orale de L-carnitine avec un placebo sur 9 semaines en association avec un entrainement en résistance. Les résultats portaient sur les performances physiques (volume de levage du développé couché, presse des jambes, puissance délivrée) et le taux de lactate sanguin post-exercice ainsi que la capacité antioxydante totale. Les participants à cette étude avaient tous 1 an d'expérience de culturisme de base.

A partir de la semaine 6, les performances au développé couché et à la presse ont été augmenté de manière significative et à partir de la semaine 9, une augmentation significative de la force et de la puissance délivrée ont été notées.

Ainsi, cette étude suggère qu'une supplémentation orale de 2 g/j de L-carnitine améliore la force musculaire et les performances anaérobies tout en diminuant les taux de lactate sanguin ainsi que les marqueurs de stress oxydatif induit par l'exercice chez les athlètes entrainés en résistance. (168)

C. Le CLA (Conjugated Lineoleic Acid)

1. Introduction

Le terme CLA ou acide linoléique conjugué correspond à un mélange d'isomères positionnels et géométriques d'acide linoléique. Il existe 2 isomères bioactifs :

- L'isomère cis-9,trans-11 (c9,t11)
- L'isomère trans-10,cis-12 (t10,c12) et semble être le plus actif des deux.

Le CLA est surtout étudié pour ses effets bénéfiques dans certaines pathologies telles que l'obésité, les cancers, le diabète et les maladies cardiovasculaires. Le CLA est

considéré comme un agent anti-obésité et peut être utile dans le processus de perte de poids. (169) Les recherches sur l'homme suggèrent que le CLA agirait pour diminuer l'adiposité en modulant propriétés métaboliques lipidiques mais des doutes subsistent quant au mécanisme d'action dans les adipocytes concernant la diminution de la masse grasse et son utilisation en tant que complément alimentaire.

2. Sources et fabrication

Le CLA est produit naturellement dans le tube digestif des ruminants tels que les bovins, chèvre, mouton, buffle et dans une moindre mesure chez le porc, poulet et dinde. Sa synthèse se produit grâce à des bactéries fermentatives (Butyrivirio Fibrisolvens) qui isomérisent l'acide linoléique dans le CLA ou via une α9-désaturase d'acide µ-trans-octadécanoïque (170).

Ainsi, la source la plus abondante est le lait et produits laitiers mais on en retrouve également en quantité non négligeable dans la graisse de bœuf.

Le CLA est fabriqué industriellement par hydrogénation partielle d'acide linoléique ou par traitement thermique, visant à produire un composé à activité biologique maximale et de composition chimique définie.

3. Mécanisme d'action

1. Sur la diminution de la graisse corporelle

Le CLA est impliqué dans les changements métaboliques qui favorisent la diminution de la lipogenèse et la potentialisation de la lipolyse, accompagnés de l'oxydation des acides gras dans le muscle squelettique.

Le CLA agit sur les récepteurs PPAR (Peroxisome Proliferator-Activated Receptor) et sont des facteurs de transcription nucléaire qui jouent un rôle central dans le stockage et catabolisme des acides gras grâce à 3 isoformes :

- PPARα et PPARβ impliqués dans le métabolisme lipidique (en particulier à l'oxydation des acides gras) et glucidique

- PPARγ impliqué dans la différenciation adipocytaire

L'inhibition de PPARγ par le CLA (t10,c12) conduit à la diminution de la graisse corporelle par modulation de l'expression des gènes impliqués dans la différenciation cellulaire, dans le métabolisme lipidique y compris l'acyl-CoA-synthétase et la lipoprotéine lipase (LPL) et dans la modulation de l'activité des protéines impliquées dans la lipogenèse et la lipolyse telles que les protéines de transport des acides gras impliquées dans l'absorption des lipides dans les adipocytes. (171)(172)

Ainsi, on observe avec le CLA une diminution de la graisse corporelle. Cette diminution est liée à une réduction de la taille des adipocytes et non pas d'une diminution du nombre d'adipocyte. Etant donné que la taille des cellules adipeuses est directement liée à la teneur en triglycérides, une diminution se traduit par une cellule plus petite.

2. Sur la perte de poids

On observe également avec le CLA une perte de poids chez des sujets ayant une complémentation orale. Ce serait lié à un autre mécanisme d'action, il s'associe avec une protéine de découplage de la chaine respiratoire (UCP) et potentialise la capacité de β-oxydation des acides gras. (173)

L'UCP se présente dans la membrane mitochondriale interne permettant le flux d'ion H+ de l'espace intermembranaire vers la matrice mitochondriale et la régulation de chaleur corporelle, mécanisme de la thermogenèse. Il en existe plusieurs isoformes :

- UCP-1 : présente dans le tissu adipeux brun exclusivement
- UCP-2 : protéine de découplage la plus exprimée et présente dans le tissu adipeux blanc
- UCP-3 : présente dans les autres tissus et les muscles

L'UCP-1 est aussi appelée thermogénine, elle accélère le retour des ions H+ vers la matrice mitochondriale de sorte que l'énergie du cycle de Krebs, provenant de l'oxydation des substrats énergétiques, y compris les acides gras, est perdue sous forme de chaleur. Si on stimule la thermogénine, cela peut conduire à une perte de poids par augmentation de la température corporelle. (174)

L'UCP-1 est responsable de l'oxydation des lipides et produit de la chaleur dans le tissu adipeux brun (abondant chez les animaux hibernant). Les adultes humains ont un niveau plus élevé de tissu adipeux blanc que de tissu adipeux brun.

La lipolyse résultant du jeûne semble stimuler les UCP puisque les interactions des acides gras avec les PPAR semblent augmenter l'expression des UCP. (175)

6. Les vitamines, oméga-3 et antioxydants

A. Les complexes multivitamines

Historiquement, dans les années 1980-1990, les culturistes utilisaient des régimes restrictifs qui éliminaient des aliments ou groupes d'aliments entiers, induisant ainsi des états de carences en vitamines et minéraux courantes.

Plus récemment, les approches alimentaires sont plus flexibles, on note moins de carences en micronutriments et le fait de n'omettre aucun aliment ou groupe d'aliments font partie des recommandations alimentaires des culturistes. (176)

B. Les lipides insaturés

Nous allons parler ici des acides gras ω-3. Ils sont faiblement apportés par l'alimentation dans les régimes occidentaux par rapport à d'autres sources de graisse alimentaires (comme les ω-6) et un faible apport de lipides ω-3 est associé à une mauvaise santé multi-spectre dans les études épidémiologiques. (177)

Le déficit est particulièrement marqué, dans le monde occidental, en acide eicosapentaénoïque (EPA) et en acide docosahexaénoïque (DHA). Les études sont controversées et mitigées concernant l'influence du DHA et de l'EPA à stimuler la synthèse des protéines musculaires et avoir des effets anabolisants.
C'est également le cas pour les études ayant pour but de montrer une influence positive sur l'hypertrophie musculaire et les performances à l'entrainement en résistance.

Une étude de 2014 (178) montre que la consommation régulière d'huile de poisson peut augmenter la réponse de la synthèse de protéines musculaires suite l'ingestion de protéine tandis qu'une autre étude de 2016 (179) ne montre aucun effet d'une supplémentation en huile de poisson sur l'augmentation de la réponse de la synthèse de protéines musculaires suite à l'ingestion de protéine après un entrainement en résistance.

Concernant les études faites sur l'hypertrophie, elles sont peu nombreuses donc peu de preuves. (180)

Cependant et pour information, au-delà du culturisme, des méta-analyses récentes ont rapporté qu'une supplémentation en huile de poisson (contant du DHA et de l'EPA) permet de :

- Diminuer la dépression (181)
- Diminuer la tension artérielle (182)
- Diminuer le tour de taille (183)

C. Les antioxydants

Les antioxydants, se retrouvant dans l'alimentation notamment dans les fruits et légumes, ont pour but de lutter contre les dérivés réactifs de l'oxygène responsables de destruction cellulaire suite à un stress oxydatif (exercice physique, toute situation de stress intense, etc.).

Le but d'une supplémentation en antioxydants est que ceux-ci vont réduire les dommages musculaires et la fatigue, stimulant ainsi la récupération et permettrait un meilleur entrainement les séances suivantes.

Cependant, la plupart des études montreraient une absence de bénéfices voire des effets négatifs des antioxydants concernant l'hypertrophie musculaire adaptative. De même, les antioxydants vont diminuer la réponse inflammatoire or la régulation à la hausse de médiateurs inflammatoires (suite à un exercice physique) est essentielle à la régénération musculaire. On peut donc se demander si les antioxydants sont bénéfiques pour l'adaptation musculaire à long terme. (184)

Aucune amélioration des performances n'a été jusqu'à présent démontrée avec les antioxydants.

7. Cas des boosters de testostérone

A. Le tribulus terrestris

Le *tribulus terrestris* est une herbe utilisée dans la médecine ayurvédique et est principalement reconnue pour la santé masculine. Elle possèderait des vertus bénéfiques pour la virilité et la vitalité et serait plus spécialement destinée à avoir une action cardiovasculaire et urogénitale.

Les compléments alimentaires à base de *tribulus terrestris* sont vendus comme améliorant la libido et auraient des propriétés supposées sur la stimulation de la testostérone.

Les études dans les performances sportives n'ont pas toutes trouvé d'avantages. Par exemple, une étude où aucune influence n'est démontrée au niveau de testostérone totale chez des hommes ayant consommé 200 mg/j de *tribulus terrestris* (185) ainsi que dans une étude faite sur des rugbymen (186) ne démontrant aucune influence de cette plante sur la force et la puissance.

B. Le ZMA (Zinc Magnésium Vitamine B6)

Le ZMA est une formule brevetée contenant du Zinc, du Magnésium et de la Vitamine B6. Cette formule est censée augmenter les niveaux de testostérone mais aucune preuve scientifique ne démontre que cela se produit chez l'homme en bonne santé, sans carence en zinc.

L'aspartate aurait également des effets sur l'augmentation des niveaux de testostérone mais les doses dans la formulation du ZMA sont trop faibles pour avoir un quelconque impact. (187)

Malgré cela, la ZMA reste un bon complément alimentaire pour pallier au déficit en micronutriments que sont le zinc et le magnésium, particulièrement fluctuant lors d’exercice physique quotidien.

PARTIE IV : PERTINENCE D'UTILISATION, EFFICACITE ET CONSEILS LIES AUX DIFFERENTS COMPLEMENTS ALIMENTAIRES ET PRODUITS POUR CULTURISTES, EFFETS INDESIRABLES, PHARMACOVIGILANCE ET DIETETIQUE

I. Introduction

A. Pertinence des études scientifiques et difficulté de réalisation

Premier point de cette introduction concerne les études scientifiques d'un produit testé chez le culturiste. En effet, il est difficile de mettre en œuvre ces études puisque c'est un domaine qui possède beaucoup de polymorphisme inter-individuel et environnemental.

Un grand nombre de facteurs jouent sur la réponse anabolique, la performance physique et le résultat esthétique d'un individu. Ils sont répartis dans 3 grandes parties que sont la diététique, l'exercice physique (intensité et volume) et le repos. Ainsi, pour commencer une étude sur l'efficacité d'un produit à agir sur la réponse anabolique ou les performances physiques, il faudrait déjà que ces 3 catégories soient strictement respectées par les sujets de l'étude.

Ainsi, pour une étude significative d'un produit sur les culturistes, il faudrait que les sujets de l'étude aient :

- La même diététique. Dans le sens où l'apport calorique journalier et hebdomadaire soient les mêmes, l'apport calorique journalier et hebdomadaire par macronutriments (glucides, lipides, protéines) soient les mêmes.
- La même dépense énergétique. Rigoureusement cadrée par la même séance d'entrainement.
- Des mêmes temps de repos entre chaque exercice, entre chaque séance d'entrainement et un même temps de sommeil par nuit.

- Un niveau sportif globalement identique notamment au niveau de l'expérience et de l'ancienneté de la pratique puisqu'un débutant aura une marge de progression bien plus importante qu'un culturiste intermédiaire et confirmé.

La pertinence de l'étude et le suivi des sujets sont très complexes à appliquer. Les performances physiques résultent d'une bonne diététique et une bonne diététique (et le repos) influent sur les performances physiques.
Tout industriel commercialisant son produit aimerait que celui-ci soit primordial pour la performance physique et/ou pour la réponse anabolique, donc il faut également faire attention à certaines études financées par ces industriels, pouvant être sponsor de compétitions amateurs et professionnels, où la question du biais se pose toujours.

Pour conclure sur ces études, en 2020, seuls deux produits pour sportifs possèdent des allégations de santé concernant l'augmentation de la masse musculaire et l'amélioration des performances physiques :

- La créatine. L'EFSA a validé l'allégation « améliore les capacités physiques en cas de séries successives d'exercice très intenses de courte durée pour une denrée alimentaire garantissant un apport journalier de 3g »
- Les protéines issues du lait (lactosérum et caséine). L'EFSA a validé l'allégation « contribuent à l'augmentation de la masse musculaire ». (188)

Pour tous les autres produits pour sportifs et compléments alimentaires, aucune allégation de santé n'a été approuvé par l'EFSA. C'est-à-dire qu'il n'y a pas assez de preuves scientifiques concernant leur efficacité.

B. Notions élémentaires diététiques et bases du résultat en culturisme

Le culturisme impose un mode de vie particulier. En effet, les semaines d'un culturiste sont rythmées par ses séances d'entrainements, pluri-hebdomadaire, selon le niveau du culturiste, et par une diététique saine, équilibrée et réfléchie.

3 facteurs de progression sont intrinsèquement liés et indissociables les uns des autres. Il s'agit de la diététique, de l'entrainement et du repos. Comme nous l'avons vu précédemment, la diététique influe sur l'entrainement et la qualité du repos,

l’entrainement va influer sur la diététique et la qualité de repos va influer sur les performances physiques.

Il est aisé de maîtriser ses séances d’entrainements et ses temps de repos tant ils sont malléables à souhait. Le facteur le plus difficile à maitriser est donc la diététique. C’est le point le plus important d’un culturiste, il faut donner le bon carburant à son organisme que ce soit de manière quantitative mais également qualitative.

Une diététique réfléchie est une diététique calculée. Globalement, pour prendre du poids, il faut un apport calorique journalier supérieur à la dépense, donc une balance énergétique positive. Et dans le cas contraire, pour perdre du poids, il faut une dépense calorique journalière inférieure aux apports, donc une balance énergétique négative. Rien de plus simple dans la théorie, mais bien plus complexe dans l’application. C’est le principe de la balance énergétique positive (apport > dépense) et négative (apport < dépense).

En partant de ce principe, il faut ainsi calculer sa dépense énergétique journalière (DEJ). Elle se compose de la dépense métabolique de base dépendante du sexe, de la taille et de la composition corporelle (poids, masse grasse, masse sèche) d’un individu à laquelle on multiplie un indice d’activité physique qui correspond à l’activité physique journalière d’un individu (activité professionnelle et extra-professionnelle). Une fois la DEJ calculée, il reste ainsi à calculer les apports caloriques de la journée et être supérieure pour prendre du poids ou inférieure pour perdre du poids. (189)

Cependant, ce total calorique journalier doit être partagé consciencieusement entre les macronutriments, c’est-à-dire les glucides, les protéines et les lipides. Nous y reviendrons dans le dernier point mais c’est pour cela que le culturiste pèse ce qu’il mange sachant que :

- 1g de glucides apporte 4 calories
- 1g de protéines apporte 4 calories
- 1g de lipides apporte 9 calories (190)

8. Compléments alimentaires et produits pour sportifs

A. Les protéines

La consommation de protéines est à la base du développement musculaire. C'est un facteur prépondérant au gain de masse musculaire puisqu'un apport augmenté de protéines provenant d'aliments entiers et/ou de suppléments de haute qualité protéique améliore la réponse adaptative à l'entrainement.

C'est l'apport exogène (alimentaire et complémentaire) le plus important chez le culturiste, c'est en ce sens que les protéines en poudre sont les suppléments les plus utilisés chez les culturistes (86% d'entre eux d'après une étude de 2013) (191) et certainement le complément à l'alimentation le plus consommé par les débutants.

Une consommation accrue de protéines permet :

- Une réparation plus rapide des microlésions des fibres musculaires causées par les entrainements en résistance donc une récupération plus rapide entre les séances et permet d'enclencher le processus d'hypertrophie musculaire. En effet, le muscle lésé par l'entrainement va réagir par adaptation, c'est-à-dire qu'il va synthétiser des fibres musculaires plus grosses et plus nombreuses en fonction des stimulus. Plus le muscle est mis à l'épreuve, plus il va réagir en s'adaptant et en s'hypertrophiant, à condition qu'on lui donne les nutriments nécessaires, les protéines.

- Un maintien de la masse musculaire pendant une période de restriction calorique. En effet, lors d'une restriction calorique, la balance énergétique est négative et l'organisme réagit physiologiquement à cela en déstockant l'énergie accumulée. Cependant, l'organisme est conçu de telle manière à conserver la masse grasse (source de haute énergie puisque pour rappel, 1 gramme de lipide équivaut à 9 calories) et pioche dans les réserves de glucides et de protéines dans un premier temps. C'est ainsi qu'il faut augmenter ses apports de protéines pour éviter un maximum la perte de masse sèche liée à l'entrainement en résistance et à la restriction calorique.

1. Recommandations

En fonction de l'activité physique, du poids corporel et du niveau sportif, chaque individu aura une consommation de protéines différentes. La consommation de protéines se mesure en gramme de protéine par kilogramme de poids corporel et par jour.

L'ANSES considère que la référence nutritionnelle des adultes en bonne santé est de 0,83 g/Kg/j. Cependant, l'agence précise bien qu'il est difficile de définir une limite supérieure de sécurité pour l'apport protéique en raison de l'insuffisance de données disponibles. De ce fait, l'ANSES considère comme prudent, pour un adulte de moins de 60 ans, une consommation de protéines dans un intervalle compris entre 0,83 et 2,2 g/Kg/j. (192)

Selon une méta-analyse de 2018, 1,6 g/Kg/j permet de maximiser l'hypertrophie induite par l'entrainement en résistance. (193)

Malgré les recommandations, les culturistes consommeraient jusque 4,3 g/Kg/j chez les hommes et jusque 2,8 g/Kg/j chez les femmes selon certaines études, dépassant de loin ces recommandations. (194) C'est surtout en période de perte de masse grasse lors de laquelle ces recommandations protéiques seront largement dépassées. Par exemple, dans une revue récente publiée par Helms et al. (195), il est suggéré de consommer entre 2,3 à 3,1 g/Kg/j pour des athlètes maigres entrainés en résistance pendant une restriction calorique pour le maintien de la masse musculaire.

En tant que professionnel de santé, il serait imprudent de conseiller une consommation de protéine au-delà des recommandations de l'ANSES, c'est-à-dire 2,2 g/Kg/j. Cependant, dans la pratique, ce n'est pas si simple et comme on peut le constater, les culturistes peuvent largement dépasser cette limite en raison du poids corporel, notamment du taux de masse sèche, et de l'objectif calorique à atteindre selon la période. Au plus la masse sèche d'un individu sera importante, au plus il faudra apporter de protéines à l'organisme pour la conserver lors d'une restriction calorique.

2. Sécurité en matière de consommation de protéines

1. Impact rénal et hépatique

Selon la société internationale de la nutrition sportive (ISSN) ayant émis un récent rapport sur les protéines et l'exercice (196), une pléthore d'études démontrent l'innocuité d'une consommation accrue de protéines mais malgré cela, de nombreuses inquiétudes persistent concernant leurs implications cliniques, en particulier sur la santé hépatique et rénale. La majorité de ces préoccupations proviennent de patients insuffisants rénaux et d'un dogme éducatif qui n'a pas été réécrit, car les preuves démontrent le contraire.
Selon eux, certes les personnes insuffisantes rénales doivent surveiller leur consommation en protéines et adopter un régime faible en protéines, mais étendre cette physiopathologie à des individus entrainés par l'exercice, en bonne santé et qui ne sont pas cliniquement compromis, est inapproprié.

Les études publiées à ce sujet indiquent systématiquement qu'une augmentation de l'apport en protéines par les athlètes de compétition et les individus actifs ne fournit aucune indication de dommages ou de lésions hépato-rénales. (197)(198)
De même, les travaux d'Antonio et ses collègues ont publié une série d'enquêtes sur des consommations extrêmement élevées de protéines (entre 3,4 et 4,4 g/Kg/j) et n'ont signalé aucun effet nocif. Ces études ont été réalisé sur huit semaines mais ils ont également réalisé une étude sur un an (199) chez quatorze hommes en bonne santé et formés à l'entrainement en résistance. Ils ingéraient entre 2,5 et 3,3 g/Kg/j de protéines et cette consommation chronique élevée en protéines n'a montré aucun effet nocif sur la fonction rénale ou hépatique. De plus, il n'a eu aucune altération des marqueurs cliniques du métabolisme et des lipides sanguins.

2. Impact osseux

On a longtemps reproché aux protéines d'accélérer les pertes en calcium. Ceci en grande partie lié au fait que cela semble accroître les pertes urinaires en calcium et au supposé impact rénal d'une consommation excessive de protéine.

Cependant, un apport élevé en protéine accroît l'absorption intestinale de calcium (également présent dans les protéines en poudre à base de lait de vache et soja) et donc si l'apport est plus grand, l'élimination en sera plus grande également pour permettre l'homéostasie calcique.

Chez des femmes jeunes ayant une consommation de calcium satisfaisante et suivant un programme d'entrainement en résistance, un apport protéique de 2,4 g/Kg/j durant dix jours n'induit aucun effet délétère sur l'intégrité osseuse (200)

De même, chez les personnes âgées, d'après une méta-analyse de 2019 regroupant plusieurs résultats d'études comparant des plus ou moins grande consommation de protéines sur la santé osseuse, il en résulte qu'une consommation supérieure à celle recommandée actuellement (0,83 g/Kg/j) est associée à un risque réduit de fracture de la hanche et de meilleur profil osseux concernant la densité minéral osseuse totale. (201)

3. Impact sur le pH corporel

Certainement le principal problème d'une grande consommation de protéines journalière est l'acidité corporel. En effet, les protéines vont être génératrices d'acides dans le corps et modifier l'équilibre acido-basique sanguin. Cet excès d'acide peut conduire à une perte de masse musculaire (catabolisme musculaire) et osseuse, une baisse des performances physiques et une difficulté à déstocker les lipides des tissus adipeux.

C'est également responsable de l'apparition d'un terrain pro-inflammatoire dans l'organisme qui a pour conséquence, notamment, une fatigue chronique, diverses inflammations (musculaires et articulaires) pouvant provoquer des blessures si couplées à un entrainement physique, apparitions d'infections (déséquilibre de la flore intestinale), changements physiologiques et métaboliques diverses.

Cette génération d'acide peut être contrecarrer par une bonne hydratation (au moins 2L d'eau par jour, entrainement compris) plus ou moins riche en bicarbonate selon les objectifs à atteindre et par consommation d'aliments basifiant.

Cette acidité corporelle augmente davantage avec la diminution parallèle des glucides en période de perte de masse grasse.

Contrer cette acidité corporelle est indispensable chez le culturiste puisque peut être responsable d'une fonte musculaire et d'une diminution du déstockage des graisses malgré la restriction calorique ainsi qu'un mauvais état global (fatigue, sujets aux blessures).

4. Impact cardiovasculaire

Les troubles cardiovasculaires ont surtout été remarqués par un régime riche en protéine chez des personnes sédentaires et souvent en surpoids. Ceci est lié à la consommation d'aliments protéiques riches en graisses saturées et n'est pas à extrapoler chez les athlètes et individus actifs ayant une diététique adaptée, riche en protéines.

3. Prise des protéines en poudre

Depuis les travaux effectués dans les années 1990, l'exercice et la consommation de macronutriments sont connues pour être synergique sur l'effet anabolisant. Le concept théorique du timing des protéines provient des résultats de l'étude de Tripton et al (202) qui en démontrent qu'une dose de 9 à 15g d'acides aminés essentiels avant et après un exercice de résistance favorise une augmentation de l'accrétion nette de protéines, non seulement 3 à 4h après l'exercice mais également sur une période de 24h.

Il a été démontré que la consommation stratégique de protéines ou diverses formes d'acides aminés essentiels péri-entrainement maximise la réparation musculaire et optimise les adaptations liées à la force et à l'hypertrophie.

Il y aurait donc un timing pour la prise de protéines en poudre. D'après les études, la consommation de protéines en poudre dans l'heure qui suit un entrainement en résistance permettrait de donner aux tissus musculaires un meilleur milieu nutritif et de maximiser l'hypertrophie musculaire. Cette période post-entrainement où les nutriments seraient mieux absorbés est ce que l'on appelle la fenêtre anabolique,

sensibilité musculaire accrue aux différents nutriments ingérés. Cependant, on observe effectivement cela chez les sportifs débutants où la consommation de protéines post-entrainement permet de maximiser la synthèse de protéines musculaires.

Mais cette importance du timing de prise de protéines est inversement liée à l'apport protéique alimentaire global. Pour les culturistes respectant strictement une diététique haute en protéines, les apports se font très régulièrement dans la journée donc seront obligatoirement aux alentours de leur entrainement. De ce fait, la question du timing de protéines ne se posent plus, bien que dans la pratique, bon nombre de culturistes privilégient un apport de protéines en poudre après l'entrainement pour des raisons pratiques et pour reconstituer les réserves le plus vite possible après l'entrainement.

4. Choix du supplément

Il existe une grande variété de protéine en poudre sur le marché. Elles diffèrent par leurs origines animales (lait de vache, œufs, bœuf) ou végétales (soja, riz, pois, chanvre, etc.), par leur méthode de filtration (concentrat, isolat, hydrolysat), par leur vitesse d'absorption (whey, caséine), etc. nous allons donc aborder les différentes protéines en poudre, leurs intérêts et leur utilisation.

Avant tout conseil sur les protéines en poudre, l'essentiel à expliquer au sportif est :

- Si les besoins protéiques journaliers peuvent être couverts totalement par l'alimentation, il est inutile de prendre des protéines en poudre.
- Les protéines en poudre ne sont qu'une alternative pratique et rapide de protéine de haute qualité biologique mais en aucun cas un substitut à l'alimentation.
- 1/3 des besoins protéiques de l'athlète peuvent provenir d'une supplémentation mais les 2/3 restants doivent être apportés par des sources variées et diverses de protéines provenant de l'alimentation.
- Avoir une cible protéique comprise entre 1,6 et 2,2 g/Kg/j si la personne n'a évidemment pas de problèmes d'insuffisance rénale avérée et diagnostiquée.

- Les protéines en poudre sont de préférence à consommer après un entrainement si la cible protéique journalière n'est pas atteinte. Sinon, cela importe peu et les protéines en poudre peuvent, de par leur excellente miscibilité, être intégrées dans des recette culinaires hyper-protéinées.

Quel que soit la source de protéines consommées, d'origine animale ou végétale, les études ne montrent aucune différence sur le long terme concernant l'hypertrophie musculaire, mesurée dans les études par des changements de composition corporelle. Dans un régime alimentaire classique, plusieurs portions de diverses sources de protéines sont consommées quotidiennement, ce qui rend probablement certaines de ces distinctions dans le profil des acides aminés et la cinétique de digestion inutiles.

Il est donc important de consommer tout au long de la journée des sources diverses de protéines (animales et végétales) pour avoir un apport complet d'acides aminés variés puisque l'aminogramme et la vitesse de digestion sont différents selon les sources.

Concernant les protéines de lait de vache, nous avions vu précédemment qu'il existe deux types de protéines, les protéines de lactosérum et la caséine. Ils sont à différencier puisqu'elles n'ont pas les mêmes propriétés en termes d'assimilation par l'organisme :

- Les protéines de lactosérum sont des protéines anabolisantes, dites à action rapide, puisque rapidement assimiler par l'organisme et stimule fortement la synthèse des protéines musculaires. On note un pic protéique dans le sang entre 40 et 60 min après l'ingestion donc idéale à prendre post-entrainement.

- La caséine regroupe quant à elle des protéines dites à action lente puisque lentement digérer par l'organisme dû à la formation de micelles qui permettent une libération prolongée d'acides aminés jusque 7h après l'ingestion. On parle plutôt ici de protéines anti-catabolisantes puisque prises au coucher, elles permettent de diminuer le catabolisme musculaire nocturne lié au fait qu'aucun nutriment n'est apporté pendant la nuit pour stimuler la synthèse des protéines musculaires.

Ainsi, les protéines de lactosérum sont plutôt à prendre le matin au réveil et/ou en post-entrainement, tandis que la caséine se prend plutôt au coucher ou quand les repas sont très espacés dans la journée ou trop peu fréquents.

De plus en plus, les individus sont soucieux de ce qu'ils consomment. D'autant plus lorsqu'il s'agit de culturiste(s) professionnel(le)(s) ou amateur(s)(trices) voué(e)(s) à leur passion, au bien-être et à la forme physique, la recherche de protéines de qualité est compréhensive.
Les whey dites « laitière » provenant directement du lait de vache (non pas de l'industrie fromagère) sont considérées de meilleure qualité puisqu'elles n'ont subi aucune étape de transformation du lait en fromage, seulement des processus thermiques et chimiques pour séparer les différentes phases du lait. Les protéines y sont moins dénaturées et ils conservent en grande partie les peptides bioactifs contenus dans le lactosérum et vu dans la première partie.
Il n'existe cependant aucune différence d'efficacité entre ces deux whey concernant les résultats sur la composition corporelle et donc concernant l'hypertrophie musculaire.

5. Situation particulière

Les différents types de protéines en poudre ne correspondent pas forcément à toute la population. En effet, l'origine des protéines n'est pas toujours clairement visible sur les emballages donc il faut toujours faire attention aux intolérances et allergies alimentaires des consommateurs.

- Allergie à l'ovalbumine : contre-indication des protéines en poudre d'œufs
- Intolérance et allergie au lactose :
    - Les formes concentrées de protéines de lactosérum ou concentré de whey, de par leur forte concentration en lactose (procédé de filtration moins poussé), est susceptible de provoquer des problèmes digestifs (ballonnements, maux d'estomac, diarrhées, flatulences, etc.). On opte donc pour des formes avec des filtrations plus poussées permettant d'éliminer une grande quantité de lactose de la whey : les isolats et les hydrolysats.

- De même, selon la gravité de l'intolérance au lactose :
  - Conseiller un isolat ou hydrolysat si apparition de symptômes digestifs lors de consommation de lait ou si intolérance légère connue
  - Conseiller une alternative aux protéines de lait si l'intolérance est modérée ou sévère ou en fonction des symptômes perçus, soit les protéines végétales, soit des protéines d'œufs ou de bœufs en poudre.
- Concernant les allergies, conseiller directement une alternative aux protéines de lait tel que les sources de protéines végétales (soja, riz, etc.)

Il existe également des situations dans lesquelles les culturistes ne consomment pas de protéines d'origine animale et optent pour différents types de végétarisme. Dans ce cas présent, il est évidemment conseiller d'orienter le culturiste vers la consommation de protéines végétales et proscrire les protéines en poudre provenant du lait, des œufs ou du bœuf.

Un dernier point correspond à certaines situations qui peuvent se rencontrer, c'est la poussée de lésions acnéiques, notamment chez le consommateur adolescent ou jeune adulte, la plupart du temps localisé sur le tronc, en haut du dos, suite à des consommations de doses importantes de protéines. Pour la plupart des études, il existerait un lien entre l'apparition de lésions acnéiques suite à la consommation de protéines en poudre (203)(204).

Cependant, il faudrait mener plus d'études sur ce sujet dans le but d'évaluer la puissance de cette association lorsque d'autres facteurs de risque d'exacerbation de l'acné sont pris en compte dans la même analyse, dans le but d'éviter des facteurs de confusions possibles. En effet, ces lésions peuvent également apparaitre suite à une augmentation des frictions et de la transpiration dans le dos suite à un entrainement physique. De plus, le fait de consommer plus de protéines dans un régime alimentaire peut faire augmenter de manière concomitante les apports de graisses. En résumé, l'apparition de lésions acnéiques est-elle imputable à la prise de protéines en poudre ? Les études restent à approfondir.

B. Les BCAA

1. Effets recherchés

Pour rappel, les BCAA sont donc des acides aminés essentiels (apportés uniquement par l'alimentation) et sont les principaux acides aminés à participer à la protéosynthèse, en particulier la leucine qui stimule le plus la synthèse de protéines musculaires. Ils se concentrent majoritairement dans les tissus musculaires donc leurs niveaux diminuent durant les efforts physiques. Par exemple, une étude de Mero en 1997 (205) montrait déjà que chez des athlètes de force entrainés de manière intense pendant 5 semaines réduisait le niveau de BCAA de 20% malgré un apport en protéines de 1,26 g/Kg/j. Il est donc intéressant de se supplémenter en BCAA lorsque l'alimentation n'est pas capable d'en fournir une quantité suffisante.

Les BCAA auraient différentes propriétés :

- Hors effort : Protection des tissus musculaires contre le catabolisme grâce au maintien d'une synthèse protéique élevée
- Pendant l'effort : Diminution de la fatigue perçue, diminution de la dégradation des fibres musculaires et fournit de l'énergie durant la séance d'entrainement physique.
- Après l'effort : Réparation rapide des micro déchirures du muscle en stimulant la synthèse des protéines musculaires.

Les BCAA auraient ces propriétés ci-contre puisque contenant de la leucine, principal acide aminé à stimuler la protéosynthèse musculaire, il a été démontré qu'elle stimule la synthèse des protéines dans une mesure égale en tant que mélange de tous les acides aminés (206). Cependant, il faut qu'elle soit associée aux deux autres acides aminés essentiels, isoleucine et valine, puisqu'ingérée seule, elle diminue la concentration plasmatique en isoleucine et valine donc provoque un déséquilibre de l'aminogramme. (207)

De nombreuses montrent les effets d'une dose aigüe chez l'homme de BCAA ou leucine, au repos ou à l'exercice, augmente la synthèse des protéines musculaires

squelettiques et diminue la dégradation des protéines musculaires. Néanmoins, il existe peu d'études sur le long terme sur la supplémentation des BCAA chez les athlètes entrainés en résistance.

2. Prise

Les BCAA sont scientifiquement très controversés quant à leur intérêt dans le culturisme. Cependant, cela reste un complément inéluctable dans le monde des sports de force et de développement musculaire.

Néanmoins, il n'existe que peu d'études à long terme sur la supplémentation en BCAA chez les culturistes et actuellement, il n'existe aucune recherche sur la dose maximale sûre concernant la consommation des BCAA. Cependant, la limite supérieure sûre de la leucine s'élèverait à 550 mg/Kg/j chez l'homme adulte selon une étude (208), au-delà, une augmentation de l'ammoniémie a été constatée. Mais il faudrait davantage d'étude pour connaître les doses maximales sûre concernant l'isoleucine et la valine.

L'ANSES a publié en 2007 des valeurs nutritionnelles de référence (VNR) exprimées en mg/Kg/j concernant l'ensemble des acides aminés, de ce fait concernant les BCAA :

- Leucine : 39 mg/Kg/j
- Isoleucine : 18 mg/Kg/j
- Valine : 18 mg/Kg/j (209)

Cependant, de nombreux fabricants (1 produit sur 3) propose une dose incompatible avec les apports nutritionnels recommandés chez le sportif puisqu'aucun fabricant ne donne une préconisation en fonction du poids du sportif selon une étude de 2019 réalisée par l'institut de recherche du bien-être, de la médecine et du sport santé (IRBMS).

Dans cette étude, l'IRBMS a décrypté 45 produits de 31 marques différentes dont certaines sont faciles à trouver en pharmacie en France comme Eric Favre, Eafit, NHCO Nutrition, etc.
Cependant, les risques de dépassement de VNR en BCAA ne sont pas clairement établis. Ils préconisent donc que le pharmacien d'officine a un rôle à jouer concernant

la consommation de BCAA, premièrement sur l'explication de ce qu'est un BCAA mais deuxièmement sur le bon grammage en fonction du poids corporel, quitte à remettre en question les conseils du fabricant.

En pratique et pour information, selon l'IRBMS, 150g de fromage blanc à 20% de matières grasses apporte une quantité de leucine, d'isoleucine et de valine, équivalente respectivement à 92%, 117% et 136% des quantités moyennes apportées par les suppléments alimentaires. Il apparaît donc qu'une ration de récupération composée d'aliments courants apporte une quantité similaire de BCAA, voire parfois supérieure, aux apports proposés par les suppléments alimentaires. (210)

Les BCAA sont une alternative intéressante pour les culturistes lors de périodes de restriction calorique. En effet, la supplémentation en BCAA permet un apport uniquement d'acides aminés en matière calorique. En général, les BCAA se retrouvent dans les produits carnés et produits laitiers donc certes ils apportent des BCAA mais également d'autres nutriments caloriques (des glucides, des protéines et des lipides) donc bien plus calorique qu'une prise de BCAA seule et tous les avantages qu'ils présentent.

Dans une étude de 2016 (211), 17 hommes entrainés en résistance, âgés entre 21 et 28 ans, ont reçu soit un placebo, un sucre, (n =8), soit des BCAA (n=9) couplé à un régime hypocalorique. Cette étude a montré que les individus sous BCAA pris avant et après l'entrainement ont maintenu leur masse maigre et leur performance physique par rapport au groupe placebo chez lesquels on a observé une perte de masse musculaire mais un maintien des performances physiques et une amélioration de la force (lié à la prise de sucre, régénérateur de glycogène).

C. Leucine et HMB

La leucine est l'acide aminé qui stimule le plus la synthèse des protéines musculaires. Il peut activer des facteurs protéiques qui sont susceptibles de majorer les effets de l'exercice de force sur les synthèses protéiques musculaires. La leucine, en modulant la signalisation cellulaire, exerce des fonctions anaboliques lorsque fournie en quantité suffisante.

Au-delà d'une prise de 500 mg/Kg/j de leucine, l'ammoniac sérique augmente. Comme vu précédemment, la leucine ne se prend pas seule puisqu'elle diminue les concentrations d'isoleucine et de valine donc perturbe l'aminogramme et de plus, l'isoleucine et la valine permettent de perdurer l'action anabolique de la leucine.
Concernant les données sur son métabolite, le HMB, il a été démontré qu'il diminuait le catabolisme des protéines et augmentait la synthèse des protéines musculaires. (212)(213) 2 méta-analyses ont également conclu que le HMB est sûr et ne provoque aucun effet secondaire majeur concernant les fonctions hépatiques, rénales, le cholestérol, les globules blancs, l'hémoglobine ou la glycémie. (214)(215)(216)

Les études du HMB en relation avec le culturisme sont peu nombreuses et dans une publication de l'ISSN concernant le HMB, la partialité de ces études est remise en cause puisque des laboratoires ont reçus des subventions externes provenant de secteurs privés.
Cependant, dans l'ensemble, le HMB seule semble être efficace dans la majorité des études avec des protocoles d'entrainements périodisés de plus longue durée, plus intenses et peut être bénéfique pendant les périodes d'entrainement intensives (217) où un besoin de récupération rapide est nécessaire

Le HMB a des résultats mitigés, il semble être efficace chez les populations à tendance cataboliques (personnes âgées, maladies chroniques) mais des études plus approfondies semblent nécessaires concernant son efficacité dans le culturisme.

Le HMB serait vendu en tant que supplément anti-catabolique avec une posologie de de 1g x 3/j, à prendre avant un entrainement pour limiter l'étendue des microlésions musculaires. De futures études sont nécessaires pour déterminer son efficacité pendant des périodes de restriction calorique chez des athlètes maigres sains et entrainés et sur des périodes de supplémentation supérieure à 8 semaines.

En raison des données contradictoires des résultats peu convaincants des études publiées chez les athlètes d'élite, peu d'argument sont présents pour justifier d'une supplémentation en HMB dans le culturisme.

D. La glutamine

La glutamine est un puissant régulateur du renouvellement des protéines et sa concentration musculaire est constamment diminuée après un traumatisme.

La glutamine est un acide aminé conditionnellement essentiel et chez le culturiste, la glutamine doit être considérée comme un acide aminé essentiel car la capacité de l'organisme à la synthétiser est inférieure à la destruction provoquée par l'effort physique.
In-vitro, la glutamine participe à l'homéostasie musculaire et la synthèse protéique, lorsqu'elle est en surplus, elle favorise l'anabolisme et quand elle est en déficit, elle favorise le catabolisme. Également, la glutamine diminue le taux d'oxydation de la leucine donc augmente les effets de la leucine dans la cellule musculaire in-vitro (218). De plus, la glutamine en elle-même peut augmenter les réserves de glycogène musculaire (219).

Cependant, peu de preuves scientifiques sont présentes pour soutenir l'utilisation de la glutamine chez les athlètes en bonne santé. De manière aigüe, il n'est pas démontré que la glutamine améliore les performances physiques, la capacité tampon, aide à maintenir les fonctions immunitaires ou diminue les douleurs musculaires à l'exercice.

Néanmoins, revenons à la glutamine et l'immunodépression d'exercice. Chez les athlètes de force, on observe des concentrations plasmatiques de glutamine, mesurées au repos, plus faibles que chez des athlètes d'endurance. Le muscle constitue une importante réserve de glutamine duquel elle est rapidement libérée au cours des états de stress, y compris à l'exercice exhaustif.

Dans toutes les études réalisées à ce sujet, une supplémentation en glutamine de l'ordre de 1 g/kg/j est susceptible d'augmenter la biodisponibilité pour de nombreuses cellules immunitaires au moment où l'organisme est vulnérable. Une moindre incidence des infections des voies aériennes grâce à une récupération des perturbations des défenses immunitaires induites par l'exercice exhaustif. (209)

Ces études ne permettent pas de cerner exactement le mécanisme d'action de la glutamine et en particulier quelles sont les composantes du système immunitaire qui

sont affectées par la prise orale de glutamine au cours de la phase transitoire d'immunodépression qui suit l'exercice exhaustif.

Bien que les études scientifiques ne soutiennent pas l'utilisation de glutamine chez le culturiste, il convient de noter que la glutamine peut être bénéfique pour la santé gastro-intestinale et l'absorption des peptides dans les populations stressées (220).

Les doses de glutamine divergent entre les fabricants (chez Eafit, 7 g/j tandis que chez NCHO nutrition, on est sur une dose de 4 g/j en phase d'attaque et 2 g/j en entretien). La dose optimale n'est pas connue mais une étude n'a observé aucun effet indésirable avec une dose orale de 14 g/j (221).

E. L'arginine

L'arginine est un acide aminé non essentiel. Lorsque supplémenté, la L-arginine est en mélange dans des formulations à prendre avant l'entrainement appelées « pre-workout ».

Ils sont consommés par les culturistes dans le but d'augmenter le flux sanguin, la synthèse des protéines musculaires et améliorer les performances physiques. Cependant, il n'existe que peu de preuves scientifiques de son efficacité dans les domaines concernés, où aucune différence avec le placebo n'est trouvée (222)(223) ou un très faible impact non significatif (224).

Il y aurait un effet positif de l'arginine sur l'hormone de croissance. Ceci reste très controversé scientifiquement et les résultats d'études se contredisent. Certains fabricants préconisent une supplémentation en arginine à prendre avant le coucher pour améliorer la libération nocturne de l'hormone de croissance mais les études scientifiques ne sont que peu nombreuses avec des résultats contradictoires.

Les doses couramment utilisées sont inférieures aux doses limites estimés à 20g/j et ne semblent pas être nocives.
Cependant, la L-arginine peut attirer l'eau et électrolytes dans la lumière de l'intestin via une formation de NO induisant des troubles gastro-intestinaux de type diarrhées.

Ces diarrhées osmotiques ont tendance à apparaitre avec des doses supérieures à 10g en une prise. (225)

Chaque formule « pre-workout » contenant de l'arginine est susceptible de provoquer des troubles gastro-intestinaux si la prise n'est pas contrôlée.

F. La citrulline

Le malate de citrulline est la forme la plus étudiée chez le sportif et agit comme agent tampon via deux mécanismes comme vu dans la partie III :

- Participe à l'élimination de l'ammoniac cellulaire via le cycle de l'urée
- Le malate est un intermédiaire du cycle tricarboxylique qui peut diminuer l'accumulation cellulaire d'acide lactique

La citrulline est métabolisée en arginine dans l'organisme mais comme vu dans le point précédent, elle ne semble pas avoir d'effet ergogénique chez les jeunes athlètes en bonne santé.

Cependant, malgré l'absence démontrée d'effets ergogéniques liés à la prise de malate de citrulline, certaines études ont montré qu'une prise de 8g de malate de citrulline avant l'entrainement augmente les répétitions à l'échec de 50% (plus de répétitions effectuées jusqu'à épuisement), une diminution des douleurs musculaires ressenties de 40% et une amélioration de la force maximale et du pouvoir anaérobie (226)(227)(228)

Ainsi, selon la méta-analyse de Trexler et al. (229) qui passe en revue 12 études de l'utilisation de la citrulline sur la force et la puissance, il existe un faible avantage significatif pour la citrulline par rapport aux placebos. Cependant, cette méta-analyse conclut que pour des athlètes de haut niveau où les résultats sont décidés sur de petites marges comme les culturistes, la supplémentation en citrulline peut être pertinente.

La citrulline est une meilleure alternative à l'arginine pour deux raisons :

- La citrulline est facilement convertie en arginine dans l'organisme

- La citrulline est mieux absorbée par l'intestin et ne provoque pas de troubles gastro-intestinaux

Le malate de citrulline se retrouve également le plus souvent dans des formulations « pre-workout » destinés à améliorer les performances physiques pendant l'entrainement.

Une prise de 6 à 8 g/j, à prendre 60 min avant la séance d'entrainement, est recommandée pour avoir une absorption suffisante et obtenir certains avantages qui pourraient intéresser les culturistes.

G. Bêta-alanine et carnosine

La Bêta-alanine et la carnosine sont étroitement liées. De plus en plus populaires chez les culturistes, une fois la bêta-alanine ingérée, elle pénètre dans la circulation et est absorbée par le muscle squelettique où elle est utilisée pour synthétiser de la carnosine. Celle-ci est un tampon du pH cellulaire important lors des exercices anaérobies.

Ainsi, la prise de bêta-alanine peut améliorer l'endurance des athlètes en résistance, permettant d'augmenter la charge de travail et retarder le début de la fatigue lors d'exercice de haute intensité. (230)
Elle permet également d'améliorer la composition corporelle grâce à une augmentation de la masse maigre et une diminution de la masse grasse (231).

Toutes les études ne montrent pas de bénéfices à la supplémentation en bêta-alanine concernant les performances sportives. Cependant, une méta-analyse de Hobson et al. (232) comprenant 15 études sur la supplémentation en bêta-alanine montre une amélioration nette des capacités d'exercice et des performances physiques sur des exercices de 60 à 240 secondes.

De cette méta-analyse a été conclu que 4 à 6 g par prise augmente le niveau de carnosine musculaire. Néanmoins, il faut une période de 4 semaines pour atteindre des concentrations de carnosine qui produiraient un effet ergogène et à la condition d'une prise continue quotidienne.

Il est donc raisonnable pour les culturistes de consommer 3 à 5 g/j pendant les phases d'entrainement à répétitions élevées ou à fortes intensités.
Cependant, il existe actuellement un effet secondaire connu de la bêta-alanine : une paresthésie qui apparaît après ingestion d'une dose aigüe, supérieure à 8g ou 10 mg/Kg (233). C'est inconfortable, inoffensif qui affecte le visage, l'abdomen, la poitrine et les extrémités et serait probablement liées à une surproduction d'histamine. Cet effet indésirable peut de ce fait être évités si les consommations sont moindres ou sont espacées de 3h d'intervalle ou avec des formulations de bêta-alanine à libération prolongée.

Pour conclure, la bêta-alanine, se trouvant également dans les formulations « pre-workout », peut augmenter les performances physiques et augmenter la masse maigre chez le culturiste et semble actuellement sûr dans les doses recommandées. Cependant, des études sont nécessaires pour déterminer la sécurité de cette supplémentation sur le long terme.

H. Les suppléments « pre-workout »

Comme son nom anglosaxon couramment utilisé l'indique, c'est un supplément à prendre avant l'entrainement et destiné à augmenter les performances physiques grâce à leur action sur la fatigue, sur l'acidose musculaire liée à l'exercice et leur capacité à stimuler le système nerveux.

Il existe une multitude de produits marketing basé sur cette appellation mais ils ont tendance à regrouper toujours les mêmes composants, c'est-à-dire :

- Caféine
- Bêta-alanine
- L-citrulline
- L-arginine
- L-tyrosine : acide aminé précurseurs de trois neurotransmetteurs (dopamine, adrénaline et noradrénaline). Aucune étude n'a démontré son efficacité sur la fatigue.
- BCAA
- Plantes à caféine et plantes adaptatives (guarana, rhodiole, etc.)

De nombreux composants et de nombreuses formulations de produits pour un même but : augmenter les performances physiques. Cependant, aucune étude n'a démontré leur efficacité par rapport à un placebo. Les seuls ingrédients à avoir un léger effet sur les performances physiques sont la citrulline et la bêta-alanine comme vu précédemment.

Concernant la caféine, les nombreuses études constatant des augmentations de performances physiques chez les athlètes de force étaient pour des doses à la limites des doses définies comme sûres : 4 à 6 mg/Kg/j. (234)
De plus, il apparaît que la consommation régulière de caféine peut entrainer une réduction des effets ergogéniques. Ainsi, cela peut nécessiter un cycle pour que les athlètes de force et culturistes obtiennent un effet ergogénique maximal.

I. La créatine

La créatine possède les allégations de santé l'augmentation des capacités physiques lors de séries successives d'exercices très intenses de courte durée pour un apport journalier de 3g. De nombreuses études démontrent le gain de masse musculaire et de force lors de l'utilisation d'une supplémentation en créatine.

Concernant l'augmentation de la masse musculaire, celle-ci est le plus souvent attribuée à une rétention d'eau et ne correspond qu'à de très faibles variations de la masse musculaire, autrement dit liées à un anabolisme musculaire.

Concernant l'amélioration des performances physiques, celle-ci est valable pour des exercices de très courtes durées et de haute intensité. Cette amélioration serait étroitement liée à l'efficacité de la prise orale de créatine et à son accumulation dans le muscle, soulignant ainsi le rôle déterminant joué par la disponibilité en phosphocréatine sur la re-synthèse de l'ATP pendant la contraction. Egalement, une augmentation de la concentration initiale en créatine musculaire permet une re-synthèse plus rapide de phosphocréatine et une moindre acidose pendant l'exercice.

Il existe une inconstance des effets ergogéniques liés à une variabilité inter individuelle concernant la rétention de la créatine dans le muscle et dans sa transformation en

phosphocréatine. Selon l'étude de Syrotuik effectuée en 2004 (235), 25 à 30% des utilisateurs en sont insensibles. L'analyse des différents sujets de l'étude révèle que plus les muscles sont majoritairement composés de fibres de type II (fibres recrutées pour les exercices de force, en opposition aux fibres de type I recrutées pour les exercices d'endurance), plus les sujets vont être répondeurs à la créatine. Il est donc évident ici que la créatine est indiquée exclusivement pour des sports qui nécessite de la force musculaire.

Il est couramment dit de débuter sa supplémentation en créatine par une dose de charge correspondante à 20-25 g/j pendant 7 jours puis une dose plus modérée correspondante à la phase d'entretien et comprise entre 3 et 5 g/j. Cependant, cette phase de charge n'est pas nécessaire puisqu'une étude montre qu'une supplémentation en créatine monohydrate à 3 g/j pendant 28 jours s'est avérée similaire à une consommation de créatine monohydrate après une phase de chargement typique. (236)

Ainsi, on préconisera aux culturistes une dose de créatine monohydrate de 3 à 5 g/j pendant 28 jours pour arriver à saturation des réserves en phosphocréatine au bout de cette période.

Il existe une multitude de formulations de créatine sur le marché dites plus efficaces que la créatine monohydrate. Cependant, aucune étude n'a démontré que les versions plus récentes telles que la créatine kré-alkalyn et la créatine ester-ethylique sont plus efficaces que la créatine monohydrate bien que le prix soit plus élevé.

J. Les compléments glucidiques

Les glucides ont un intérêt particulier dans le monde du culturisme. Ce sont, en grande partie, les variations d'apports glucidiques qui vont influencer les performances physiques et les résultats esthétiques.
Un apport faible en glucides pendant une période de restriction calorique sera synonyme d'une diminution des performances physiques mais d'un meilleur résultat esthétique.

Lors d'exercices d'intensité modérée ou élevée, les carbohydrates (ou glucides) sont le principal substrat énergétique, et l'appauvrissement en glycogène est un facteur limitant majeur de la performance.

Ainsi, il existe sur le marché différents types de carbohydrates en poudre, soit à bas index glycémique soit à haut index glycémique.

Ces derniers sont à consommer de préférence :

- Pendant la séance d'entrainement puisque ces glucides sont rapidement assimilés et permettent de reconstituer rapidement le stock de glycogène. Par conséquent, ingérés pendant l'entrainement, ils permettent de réduire la dégradation des acides aminés favorisant un bilan azoté positif. (237)
- Après l'entrainement pour une régénération optimale du glycogène potentialisé par l'augmentation de la sensibilité musculaire à l'insuline après exercices de haute intensité. Ces carbohydrates peuvent être co-ingérés en post-entrainement avec des protéines pour faciliter l'absorption musculaires de ces dernières.

La prise de glucides dépend du poids de la personne et de l'objectif calorique journalier à atteindre. Cependant, on conseillera une consommation majoritaire de glucides à faible index glycémique aux différents repas de la journée, que ce soit alimentaire ou en supplément en poudre que l'on peut intégrer dans des préparations, et une consommation de glucides à index élevé autour de l'entrainement.

Il existe cependant des recommandations pour la prise de glucides visant à l'augmentation des performances physiques (238) :

- 1 à 4h avant la séance d'entrainement :
    - 1 à 4 g/Kg de glucides à index glycémique bas
    - Maximum de 90 g/h de glucides à index glycémique élevé.
- 2 à 4h suivant la séance d'entrainement :
    - 1 g/Kg/h de glucides à indice glycémique élevée pour reconstituer de manière optimale les stocks de glycogène.

K. La L-carnitine et dérivés

Longtemps prisée pour son rôle dans le transport des acide gras dans les mitochondries synonyme d'oxydation des acides gras et perte de graisse, aucune étude n'a démontré d'efficacité de cette acide aminé sur la perte de masse grasse.

Cependant, des études remarquent que dans certaines disciplines sportives (surtout lors de performances anaérobies), il semblerait, d'après une étude d'Arenas en 1991 (239), que les sportifs de force et de puissance seraient plus sujets aux déficits en carnitine.

Selon les études sur les performances physiques, la supplémentation en carnitine reste mitigée, la plupart des études ne démontrent aucune augmentation force tandis qu'une petite minorité montre une légère augmentation.

Selon les études sur la récupération musculaire, une supplémentation en carnitine semblerait diminuer les marqueurs sériques de dommages musculaires après un exercice en anaérobie, grâce à une meilleure oxygénation des tissus musculaires (166). Ce mécanisme pourrait être également à l'origine du plus grand volume de travail observé dans les études de supplémentation en carnitine.

Quant à la prise de ce complément :

- L-carnitine : 500 mg à 2 g/j
- Equivalent en ALCAR (Acétyl-L-carnitine) : 630 mg à 2,5 g/j
- Equivalent en LCLT (L-carnitine-L-Tartrate) : 1 à 4 g/j

Aucun effet indésirable n'est à signaler pour ce complément. Cependant, dans certaines études, on note une odeur particulière liée à la formation de triméthylamine dans 4% des L-carnitine étudiées. (L'adjonction de riboflavine peut atténuer cette odeur et peut se retrouver donc en association dans les compléments de carnitine).

L. Le CLA

Il n'existe que peu d'études sur le CLA dans les populations sportives comparées aux populations obèses donc il est difficile de tirer des conclusions sur l'effet du CLA chez le sportif.

Une étude de 2005 (240) a étudié l'effet du CLA, dose de 3,4 g/j, sur 2 ans chez des hommes en bonne santé. L'étude ne démontre pas si les changements de composition corporelle sont directement imputables au CLA, à l'exercice physique ou à la combinaison des deux.

Par conséquent, les preuves cliniques semblent insuffisantes et ne font pas l'unanimité concernant les effets du CLA sur la diminution de la graisse corporelle et des effets indésirables ont été décrit sur des souris et in-vitro sur des adipocytes humains tels que :

- Effet pro-cancérigène avec le composant t10,c12 (241)
- Altération négative du profil lipidique (242) avec augmentation des triglycérides et du LDL-cholestérol et une diminution du HDL-cholestérol
- Altération négative du métabolisme glucidique avec résistance à l'insuline dans certaines études (243)(244)

Aucune extrapolation à l'homme ne peut se faire puisque dans les études sur de longues période chez l'homme en bonne santé, aucun effet indésirable dans les doses recommandées n'a été décrit.

Concernant la prise, 3,4 g/j semble être la dose maximale efficace donc inutile de prendre une quantité supérieure à cette dose. On recommandera par ailleurs une consommation alimentaire enrichis en CLA plutôt qu'une supplémentation pour une diminution accrue de l'adiposité.

9. Pharmacovigilance

A. Nutrivigilance

Il existe en France un dispositif de nutrivigilance est un système de veille sanitaire dont l'objectif est d'améliorer la sécurité consommateur en identifiant rapidement d'éventuels effets indésirables liés, notamment, à la consommation de :

- Compléments alimentaires
- Aliments ou boissons enrichis en substances à but nutritionnel ou physiologique (vitamines, minéraux, acides aminés, extraits de plantes…)
- Nouveaux aliments et nouveaux ingrédients (phytostérols, etc.)
- Produits destinés à l'alimentation de populations particulières (nourrissons, sportifs, patients souffrant d'intolérance alimentaire, etc.)

Ainsi, depuis la mise en place du dispositif national de nutrivigilance en 2009 jusqu'au 16 février 2016, 49 signalements ont été portés à la connaissance de l'ANSES (245), liés à des effets indésirables susceptibles d'être liés à la consommation de compléments alimentaires destinés aux sportifs visant le développement musculaire ou la perte de masse grasse. Parmi ces 49 signalements, 17 étaient suffisamment complets pour pouvoir faire l'objet d'une analyse d'imputabilité.

Ces effets indésirables sont majoritairement d'ordre :

- Cardiovasculaire : tachycardie, arythmie et accident vasculaire cérébrale
- Psychiatriques : troubles anxieux et nervosité.

Ces signalements et la consommation répandue dans plusieurs disciplines sportives de ce type de produits visant à augmenter la masse musculaire ou la diminution de la masse grasse, amènent l'ANSES à attirer l'attention sur les risques potentiels pour la santé.

L'ANSES déconseille fortement la consommation aux :

- Personnes présentant des facteurs de risque cardiovasculaire ou souffrant d'une cardiopathie ou d'une altération de la fonction rénale, hépatique ou encore des troubles neuropsychiques.
- Enfants et adolescents
- Femmes enceintes ou allaitantes

1. Recommandations globales de l'ANSES sur la consommation de ces compléments alimentaires

- La consommation de compléments alimentaires contenant de la caféine est déconseillée avant et pendant une activité sportive, ainsi que chez les sujets sensibles aux effets de cette substance.
- La consommation concomitante de plusieurs compléments alimentaires ou leur association avec des médicaments est déconseillée.
- Les objectifs de la consommation de compléments alimentaires devraient être discutés avec un professionnel de santé.
- La consommation de compléments alimentaires doit être signalée à son médecin et son pharmacien.

2. Recommandations globales du ministère des sports sur la consommation de ces compléments alimentaires et norme AFNOR NF V 94-001

Les sportifs doivent être attentifs à la composition des produits consommés et privilégier les produits conformes à la norme AFNOR (Association française de normalisation) NF V 94-001, établie en juillet 2012, ainsi que les circuits d'approvisionnement les mieux contrôlés par les pouvoirs publics (conformité à la réglementation française, traçabilité et identification du fabricant). (246)

Si une consommation de compléments alimentaires destinés aux sportifs est prévue, le Ministère des Sports recommande donc :

- De prendre conseil auprès d'un professionnel de santé pour les besoins nutritionnels
- De ne pas acheter de compléments alimentaires non autorisés en France ou sur internet sans garantie du fabricant et de privilégier les compléments alimentaires bénéficiant de la norme AFNOR NF V 94-001

- D’éviter la prise prolongée, répétées et multiples au cours de l’année de compléments alimentaires sans s’entourer des conseils d’un professionnel de santé
- Signaler à son pharmacien ou son médecin de tout effet indésirable survenant suite à la consommation d’un complément alimentaire.

B. Effets indésirables caractéristiques de certains compléments alimentaires

1. Compléments hypoglycémiants

Il existe des compléments alimentaires destinés aux sportifs qui vont être hypoglycémiant donc à déconseiller la prise avant une séance d’entrainement physique. Cela est soit directement imputable à la molécule à cause d’un mésusage du complément alimentaire.

De plus, l’incidence des hypoglycémies augmentera fortement en cas de période de restriction calorique.

Il faut donc se méfier :

- De la prise aigüe de glucides avant et pendant un entrainement. La sécrétion d’insuline réactionnelle à cette prise va induire une hypoglycémie donc on conseillera de consommer par petite portion et étaler les prises dans le temps.
- La whey, particulièrement sous forme d’hydrolysat, et dans une moindre mesure l’isolat
- Le ribose à dose élevée
- La carnitine à dose élevée
- Les BCAA et arginine augmentent la sécrétion d’insuline donc capable d’induire une hypoglycémie.
- La créatine est faiblement hypoglycémiante mais attention avec les combinaisons de compléments et surtout ceux cités précédemment (247)

Il est donc important de respecter les apports glucidiques vus précédemment. On évite de consommer de grandes quantités de nutriments (glucides ou protéines) susceptibles d'augmenter la sécrétion d'insuline donc de diminuer le sucre dans le sang juste avant une séance d'entrainement afin d'éviter des hypoglycémies réactionnelles.

2. Compléments « pre-workout »

Il faut se méfier des compléments dit « pre-workout », véritable cocktail à base de molécules stimulantes, supposés diminuer la fatigue perçue et augmenter le volume d'entrainement.

En effet, ils contiennent différentes molécules susceptibles de causer des effets indésirables :

- La caféine déconseillée chez les personnes sensibles à cette molécule entrainant des tachycardies et trouble du rythme cardiaque surtout si couplé à un entrainement physique de haute intensité.
- L'arginine est responsable de troubles gastro-intestinaux de type diarrhées osmotiques
- La carnitine, comme vu précédemment, est hypoglycémiante à dose élevée
- La bêta-alanine est responsable de paresthésies à dose élevée

10. Aspect diététique chez le culturiste et recommandations

A. Période de prise de masse musculaire

1. Balance énergétique et excédent calorique

Pendant cette période, l'objectif principal est d'augmenter la masse musculaire tout en minimisant les augmentations de masse grasse grâce à la pratique d'entrainement en résistance et en maintenant une balance énergétique positive.

Il a été démontré qu'une balance énergétique positive a un effet anabolisant important, même en l'absence d'entrainement en résistance. Cependant, la combinaison d'une balance énergétique positive avec un entrainement en résistance fournit la méthode la plus efficace pour diriger l'anabolisme vers l'augmentation de la masse sèche.

Selon le niveau du pratiquant, l'excédent calorique doit être choisi avec précaution. En effet, chez le pratiquant débutant, l'excédent calorique peut être largement dépassé comme par exemple dans l'étude de Rozenek et al. (248) où un excédent de 2000 Kcal couplé à un entrainement en résistance chez des sujets non entrainés a démontré des gains de poids conséquent chez tous les sujets dont la contribution de la masse maigre pouvait atteindre 100% chez certains.
Cependant, chez des pratiquants avancés, une étude de Garthe et al. (249) a mis en évidence qu'un excédent calorique plus contrôlé (200-300 Kcal au lieu de 500 Kcal) serait plus approprié pour minimiser le risque d'augmentation inutile de la graisse corporelle.

Ainsi, les sujets débutants, plus éloignés de leur plafond génétique de masse musculaire, sont capables de gagner du muscle plus rapidement que les individus entrainés. Le taux de croissance musculaire ralentit à mesure qu'un individu devient plus avancé. Un excédent calorique agressif peut entrainer un gain inutile de graisse corporelle qui aura pour conséquence d'augmenter la durée ou la gravité de la faible disponibilité énergétique lors des périodes de restriction calorique pour perdre de la masse grasse (dite période de sèche).

Le nombre de calories au-dessus de la dépense énergétique journalière doit être définie en fonction du niveau d'expérience puis ajusté en fonction du taux de gain de poids et des changements de composition corporelle.

Selon les recommandations, suite à une période de sèche, il sera préférable de viser un gain de poids cible d'environ 0,25-0,50% du poids corporel par semaine tout en ajustant l'apport énergétique en fonction des changements dans la composition

corporelle. Une fois l'excédent calorique déterminé, l'étape suivant est de répartir les macronutriments. (250)

2. Lipides

Bien que les triglycérides intramusculaires puissent agir comme source de carburant lors d'entrainement en résistance, ils ne sont pas un facteur limitant puisque les substrats dérivent principalement de processus anaérobies.

Les culturistes ont un intérêt particulier pour les lipides puisque précurseurs de nombreuses fonctions biologiques notamment précurseurs de testostérone. La proportion de lipides ingérés dans l'alimentation va influer sur les niveaux de testostérone. Cependant, il n'est pas clair que les changements de niveau de testostérone dans les limites normales affectent de manière significative le gain musculaire.

D'après l'American College of Sports Medicine, pour les athlètes, il est recommandé de consommer 0,5 à 1,5 g/Kg/j de lipides équivalent à environ 20 à 35% du total calorique journalier. Cet apport doit donc être raisonnable et équilibré entre lipides polyinsaturés telles que les oméga-3 et oméga-6 et les graisses saturées comme les huiles à chaines moyennes, mieux absorbées par l'intestin que leurs homologues à chaines longues et sont difficilement stockées sous forme de graisse, ce qui en font une source d'énergie rapidement mobilisable.

3. Glucides

Contrairement aux protéines et aux lipides, les glucides sont considérés comme non essentiels pour l'alimentation humaine car l'organisme est capable de produire du glucose nécessaire aux tissus via la néoglucogenèse. Cependant, l'apport en glucide a un rôle important dans la diététique du culturiste en tant que régulateur des hormones thyroïdiennes et contribue aux besoins en micronutriments. Qui plus est, un régime pauvre en glucides pourrait limiter la régénération de l'ATP et limiter la capacité des muscles à se contracter avec une force élevée.

Des études ont démontré que l'entrainement en résistance réduit le glycogène musculaire de 24 à 40% en une seule séance. (251)(252) La quantité épuisée peut varier en fonction de la durée, de l'intensité et du travail effectué mais un entrainement avec un nombre de répétitions élevés et des charges modérées semble provoquer une plus grande réduction des réserves de glycogène musculaire. (253)

Des quantités optimales de glucides pour les culturistes n'ont pas été établies à ce jour. Seules des quantités modérées sont nécessaires pour produire des avantages et par conséquent, une fois que les calories ont été consacrées aux protéines (1,6 à 2,2 g/Kg/j) et aux lipides (0,5 à 1,5 g/Kg/j), les calories restantes doivent être attribuées aux glucides. Cependant, sur la base des preuves actuelles, il serait préférable de consommer des glucides dans une fourchette de 3 à 5 g/Kg/j si possible.

4. Tableau récapitulatif des calories en période de prise de masse musculaire

Facteurs à surveiller	Recommandations pour les débutants et intermédiaires	Recommandations pour les pratiquants avancés
Gain de poids hebdomadaire	Environ 0,25 à 0,50% du poids	Environ 0,25% du poids
Calories	+10-20% au-dessus de la DEJ	+5-10% au-dessus de la DEJ
Protéines	1,6-2,2 g/Kg/j	1,6-2,2 g/Kg/j
Lipides	0,5-1,5 g/Kg/J	0,5-1,5 g/Kg/J
Glucides	Calories restantes	Calories restantes

Tableau 2 : recommandations diététiques lors d'un régime de prise de masse musculaire chez le culturiste. (176)

B. Période de perte de masse grasse et de maintien de la masse musculaire dite de sèche

1. Balance énergétique et déficit calorique

Pour créer une perte de poids, plus d'énergie doit être dépensée que consommée. Cela peut être accompli en augmentant les dépenses caloriques tout en réduisant les apports. La taille de ce déficit et la durée de son maintien détermineront la perte de poids. Chez le culturiste, en plus de la perte de masse grasse, l'entretien de la masse musculaire est une préoccupation majeure pendant cette période. Les apports caloriques optimaux, les déficits et les combinaisons de macronutriments doivent être suivis tout le long de cette période en répondant aux besoins changeants qui se produisent.

L'apport calorique auquel on commence devra être ajusté au fil de la période de sèche puisque des mécanismes d'adaptations métaboliques viendront contrecarrer la perte de masse grasse :

- Changements dans la dépense énergétique
- Changements dans l'efficacité mitochondriale
- Changements dans les concentrations d'hormones circulantes

Ces changements agissent ensemble pour atténuer la perte de poids et favoriser la restauration de la masse corporelle de base. (254)

Des déficits plus importants entrainent une perte de poids plus rapide mais le pourcentage de perte de masse maigre augmente au fur-et-à-mesure que la taille du déficit augmente. Ainsi, des taux de perte de poids plus progressifs peuvent être supérieurs en termes de rétention de la masse sèche. Il faut prévoir suffisamment de temps pour perdre la graisse corporelle afin d'éviter un déficit agressif et la durée de la période doit être adaptée au pratiquant.

Il faut d'ailleurs noter que plus le concurrent est maigre, plus le risque de perte de masse sèche est élevé. Comme la disponibilité du tissu adipeux diminue, la probabilité

d’augmentation de la perte de masse sèche s’élève et il sera préférable de poursuivre une approche encore plus progressive de la perte de poids en fin de période de sèche.

Les recommandations sont une perte de poids équivalente à 0,5 à 1% du poids corporelle par semaine chez le pratiquant naturel.

2. Lipides

1. Recommandations générales sur les apports en lipides

Il existe des preuves que les lipides alimentaires influencent les concentrations d’hormones anabolisantes pouvant être un intérêt chez le culturiste voulant maintenir sa masse sèche pendant une restriction calorique. De par les différentes études réalisées, les auteurs de ces études ont conclu que les régimes trop faibles en graisses ou trop riches en protéines pourraient altérer la réponse hormonale à l’entrainement. (255)

Si une réduction des lipides est utilisée pendant la période de sèche, il peut être possible d’atténuer la baisse de testostérone en maintenant une consommation adéquate de graisses saturées. Cependant, d’après les résultats de différentes études comparant les régimes en période de sèche, il est plus efficace de maintenir des performances d’entrainement en résistance avec des apports en glucides plus élevés pour la rétention de la masse sèche plutôt que de tenter de maintenir des niveaux de testostérone avec des apports en lipides plus élevés.

Pendant cette période de sèche, des apports de lipides compris entre 20 et 30% des calories peut être un objectif irréaliste dans le contexte d’une restriction calorique sans compromettre les apports suffisants en protéines et glucides. De plus, un régime pauvre en glucides peut dégrader les performances et entrainer une baisse de l’insuline et de l’IGF-1 (Insulin-like Growth Factor-1, principal facteur de croissance musculaire) semblent plus étroitement corrélées à la préservation de la masse musculaire que la testostérone. (256)

Ainsi, un apport inférieur en lipides compris entre 15 et 20% des calories sera plus approprié pour éviter de réduire les glucides ou protéines en dessous de la fourchette idéale.

2. Un point sur le régime cétogène

Il n'existe que peu d'études sur le sujet concernant les athlètes entrainés en résistance préparant une compétition. Les recherches existantes remettent en question les points de vue traditionnels sur les glucides et les performances anaérobies. Malgré la croyance commune selon laquelle les glucides sont la seule source de carburant pour l'entrainement en résistance, les triglycérides intramusculaires sont utilisés pendant un entrainement à haute résistance à court terme (257) et devient de plus en plus viable pour les sportifs adaptés aux régimes riches en graisses et faibles en glucides. Selon les différentes études, la majorité des preuves ne sont pas en faveur des régimes très faibles en glucides. Néanmoins, il convient de noter qu'il existe un degré de variabilité dans la manière dont les individus réagissent aux régimes. L'utilisation des glucides et des lipides en pourcentage de la dépense énergétique au repos et à diverses intensités est influencée par la composition des fibres musculaires, l'alimentation, l'âge, l'entrainement, les niveaux de glycogène et la génétique (258). De plus, les pratiquants plus sensibles à l'insuline peuvent perdre plus de poids avec des régimes riches en glucides et faibles en lipides contrairement à ceux plus résistants à l'insuline. (259)

Pour conclure, les culturistes, comme d'autres athlètes, fonctionnent très probablement mieux avec des apports équilibrés en macronutriments adaptés à leurs besoins spécifiques. Le choix de régime est basé sur l'expérience personnelle, en fonction de ce qui a déjà fonctionné ou non.

3. Glucides

Dans le cas spécifique d'un culturiste en période de sèche, atteindre un déficit calorique nécessaire tout en consommant suffisamment de protéines et de lipides ne permettrait probablement pas une consommation à l'extrémité supérieure des recommandations d'apports glucidiques.

La satiété et la perte de graisse s'améliorent généralement avec des régimes faibles en glucides, spécifiquement avec des rapports protéines/glucides plus élevés. Il est recommandé aux culturistes s'entrainant dans un état calorique restreint de réduire la teneur en glucides tout en augmentant l'apport protéique pour maximiser l'oxydation des lipides et le maintien de la masse musculaire. (260)

La réduction optimale des glucides et le point auquel la réduction des glucides devient nuisible doivent être déterminés individuellement. Un seuil pratique individuel semble exister puisque des réductions glucidiques trop importantes ont un impact négatif et mettent en danger le maintien de la masse musculaire.

Ainsi, une fois le niveau de maigreur souhaité est atteint, il est préférable de réduire le déficit calorique par une augmentation des glucides pour maintenir les performances physiques et la masse musculaire. Pendant cette période, les culturistes qui atteignent la condition la plus maigre possible subissent des baisses de performances inévitables.

4. Tableau récapitulatif des calories en période de sèche

Facteurs à surveiller	Recommandations
Protéines	2,3 à 3,1 g/Kg/j
Lipides	15-30% du total calorique
Glucides	Calories restantes
Perte de poids hebdomadaire	0,5 à 1% du poids corporel

Tableau 3 : recommandations diététiques lors d'une période de sèche chez le culturiste. (250)

CONCLUSION

Un corps esthétique par la pratique du culturisme s'inscrit de plus en plus dans les mœurs françaises. Cela touche les populations jeunes et se relaient via les différents réseaux sociaux, ce qui en fait un phénomène de société en pleine expansion. Il existe différentes pratiques du culturisme, du débutant à l'expert, qui diffèrent en fonction de la fréquence des entrainements et de la diététique. Cependant, il existe un point en commun dans lequel le pharmacien d'officine a un rôle à jouer, c'est la consommation des différents compléments alimentaires.

Bien souvent, ils sont utilisés par croyance ou par expérience personnelle mais rarement par preuves scientifiques de leur efficacité. De même, les posologies ou connaissances sur la prise de ces compléments sont dictées par des autorités (laboratoire ou tierce personne) sans qu'il n'y ait de réelles recherches scientifiques ou informatives effectuées par les consommateurs.
Le pharmacien d'officine, en première ligne, se doit d'apporter des conseils simples sur la diététique en fonction de son expérience personnelle, sur la prise des compléments alimentaires : objectif, mode d'action, prise, effets indésirables potentiels et mettre en garde sur les compléments alimentaires achetés sur internet.
Il existe de grandes différences entre les culturistes, amateurs ou professionnels, et le conseil, qu'il soit pharmaceutique ou diététique, se doit d'être adapté à chaque niveau.

De par sa formation, le pharmacien d'officine ne peut se permettre de conseiller diététiquement un individu ayant de réels besoins nutritionnels spécifiques. Ceci requiert une prise en charge pluridisciplinaire, que ce soit dans le domaine sportif mais également dans le domaine médical chez des individus en surpoids ou obèses dont la nécessité est de perdre du poids grâce à un programme diététique couplé à un entrainement physique.
Le pharmacien est en première ligne face à ces différentes catégories de population, il faut donc savoir aiguiller, rediriger et collaborer avec d'autres professionnels de santé pour une prise en charge efficace en fonction des besoins (prise de masse ou perte de poids) de chaque individu.

BIBLIOGRAPHIE

1. 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.
2. Définition des compléments alimentaires selon l'ANSES – Agence nationale de sécurité sanitaire, de l'alimentation et du travail. Disponible sur : https://www.anses.fr/fr/content/les-compléments-alimentaires-0
3. Définition commune des compléments alimentaires donnée par la DGCCRF – Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes. Disponible sur : https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/s%C3%A9curit%C3%A9/produits-alimentaires/complements-alimentaires
4. Règlementation des compléments alimentaires selon SYNADIET – Syndicat national des compléments alimentaires. Disponible sur : http://www.synadiet.org/les-complements-alimentaires/reglementation
5. Déclaration de mise sur le marché auprès de la DGCCRF. Disponible sur : https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/complements-alimentaires-declarer-produits-avec-teleicare
6. Rôle de l'EFSA dans l'évaluation du bien-fondé des allégations de santé demandé par les fabricants de compléments alimentaire. EFSA – European Food Safety Authority. Disponible sur : https://www.efsa.europa.eu/fr/topics/topic/nutrition
7. Fondement de circuit de fabrication d'un complément alimentaire et de sa commercialisation selon SYNADIET – Syndicat national des compléments alimentaires. Disponible sur : http://www.synadiet.org/les-complements-alimentaires/fabrication-commercialisation
8. Principe de l'étiquetage des compléments alimentaires par SYNADIET. Disponible sur : www.synadiet.org/les-complements-alimentaires/etiquetage
9. Information sur la norme AFNOR NF V 94-001. Disponible sur : https://normalisation.afnor.org/actualites/prevention-du-dopage-et-alimentation-une-norme-afnor-pour-apporter-de-la-confiance-aux-sportifs/
10. Les chiffres clefs du marché mondial de la nutrition sportive 2017. Disponible sur : https://www.nutrikeo.com/2018/11/nutrition-sportive-5-bonnes-raisons/
11. Les chiffres clefs du marché européen de la nutrition sportive en 2016. Disponible sur : https://www.nutrikeo.com/2018/11/nutrition-sportive-5-bonnes-raisons/

12. Fédération professionnelle de culturisme IFBB. Disponible sur : https://www.ifbb-france.fr/pages/nom-structure.html
13. Règlement de la catégorie Men's classic bodybuilding. Disponible sur : http://www.ifbb-france.fr/medias/files/classic-body-building.pdf
14. Règlement de la catégorie Men's physique homme. Disponible sur : http://www.ifbb-france.fr/medias/files/men-s-physique.pdf
15. Règlement de la catégorie Men's Classic physique. Disponible sur : https://www.ifbb-france.fr/medias/files/classic-physic.pdf
16. Règlement de la catégorie bikini. Disponible sur : http://www.ifbb-france.fr/medias/files/bikini.pdf
17. Règlement de la catégorie Women's physique. Disponible sur : http://www.ifbb-france.fr/medias/files/body-building-women-s-physique.pdf
18. Histoire de la culture physique. Disponible sur : http://ffcpc.fr/crbst_11.html
19. Histoire du bodybuilding. Disponible sur : https://www.historyofbodybuilding.org/
20. Histoire d'Hippolyte Triat. Disponible sur : http://janinetissot.fdaf.org/jt_triat.htm
21. Histoire d'Eugen Sandow. Disponible sur : https://web.archive.org/web/20100325224214/http://www.eugensandow.com/story2.html
22. Résumé de la biographie d'Eugen Sandow. Disponible sur : http://body-translate.com/2015/11/eugen-sandow-bodybuildisme/
23. Histoire de la création de l'IFBB. Disponible sur : https://www.fitadium.com/TheGoodFit/bodybuilding-culturisme-commencement/
24. Régime des athlètes grecs. Disponible sur : https://archipel.uqam.ca/9355/1/M14619.pdf
25. Utilisation des protéines de lactosérum en Grèce Antique. Disponible sur : https://www.promotionsantevalais.ch/data/documents/CAM/Projets/Semaines_gout/Gout_2018/CO/Caracteristiques/factsheet-produits-laitiers-petit-lait-fr.pdf
26. Les prémices de l'industrialisation des protéines. Disponible sur : https://thoracotomie.com/2012/08/04/justus-von-liebig-et-l-extrait-de-viande/
27. Biographie de Justus von Liebig. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Justus_von_Liebig
28. Histoire du lait infantile. Disponible sur : http://www.jped.com.br/conteudo/10-86-03-179/ing.asp?cod=2094
29. Industries de fabrication de produits hyperprotéiné. Disponible sur : http://www.oxfordsymposium.org.uk/wp-content/uploads/2013/06/Steinitz.pdf

30. Découverte de l'alanine. Disponible sur : https://www.santescience.fr/alanine/
31. L'isolation des différents acides aminés au XIXe siècle. Disponible sur : https://tice.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/Famille/WWAA1.html
32. https://www.cycledekrebs.fr/hans-krebs-biographie/
33. https://tice.ac-montpellier.fr/ABCDORGA/Famille2/UREE.htm
34. http://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/963/1998_11_1297.pdf?sequence=6
35. Frederic Delavier, Michael Gundill. Guide des compléments alimentaires pour sportifs. Ed. Vigot. Page 53.
36. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5477153/ ISSN : protein and exercise
37. Kumar A, et al. Chymosin and other milk coagulants: sources and biotechnological interventions. *Crit Rev Biotechnol*. (2010)
38. Huffman LM, Harper WJ. Maximizing the value of milk through separation technologies. *J Dairy Sci*. (1999)
39. Procédé de préparation et séparation du lait destiné à la production fromagère. https://examine.com/supplements/casein-protein/research/#ref7-1
40. Frederic Delavier, Michael Gundill. Guide des compléments alimentaires pour sportifs. Ed. Vigot. Page 48
41. Nomenclature of the Proteins of Cows' Milk—Sixth Revision
42. https://examine.com/supplements/whey-protein/research/#ref16-1
43. Burton-Freeman BM. Glycomacropeptide (GMP) is not critical to whey-induced satiety, but may have a unique role in energy intake regulation through cholecystokinin (CCK). *Physiol Behav*. (2008)
44. The effect of bovine milk lactoferrin on human breast cancer cell lines. *J Dairy Sci*. (2011)
45. Muro Urista C, et al. Review: Production and functionality of active peptides from milk. *Food Sci Technol Int*. (2011)
46. Kim JH, et al. Efficacy of alphas1-casein hydrolysate on stress-related symptoms in women. *Eur J Clin Nutr*. (2007)
47. Guesdon B, et al. A tryptic hydrolysate from bovine milk alphaS1-casein improves sleep in rats subjected to chronic mild stress. *Peptides*. (2006)
48. Rousseau-Ralliard D, et al. Inhibitory effect of αS1- and αS2-casein hydrolysates on angiotensin I-converting enzyme in human endothelial cells in vitro, rat aortic tissue ex vivo, and renovascular hypertensive rats in vivo. *J Dairy Sci*. (2010)

49. Schulmeister U, et al. Cloning, expression, and mapping of allergenic determinants of alphaS1-casein, a major cow's milk allergen. *J Immunol*. (2009)
50. Cadée JA, et al. Bovine casein hydrolysate (c12 Peptide) reduces blood pressure in prehypertensive subjects. *Am J Hypertens*. (2007)
51. Townsend RR, et al. A randomized, double-blind, placebo-controlled trial of casein protein hydrolysate (C12 peptide) in human essential hypertension. *Am J Hypertens*. (2004)
52. Teschemacher H, Koch G, Brantl V. Milk protein-derived opioid receptor ligands. *Biopolymers*. (1997)
53. Taché Y, Garrick T, Raybould H. Central nervous system action of peptides to influence gastrointestinal motor function. *Gastroenterology*. (1990)
54. Wilson J, Wilson GJ. Contemporary issues in protein requirements and consumption for resistance trained athletes. J Int Soc Sports Nutr. 2006;3:7–27. doi: 10.1186/1550-2783-3-1-7
55. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5477153/#CR176
56. Safety assessment and potential health benefits of food components based on selected scientific criteria. ILSI North America technical committee on food components for health promotion. Crit Rev Food Sci Nutr. 1999;39:203–316
57. Hasler CM. The changing face of functional foods. J Am Coll Nutr. 2000;19(Suppl 5):499S–506S. doi: 10.1080/07315724.2000.10718972
58. Blusztajn JK. Choline, a vital amine. Science. 1998;281(5378):794–795. doi: 10.1126/science.281.5378.794
59. Handelman GJ, Nightingale ZD, Lichtenstein AH, Schaefer EJ, Blumberg JB. Lutein and zeaxanthin concentrations in plasma after dietary supplementation with egg yolk. Am J Clin Nutr. 1999;70:247–251
60. Symons TB, Schutzler SE, Cocke TL, Chinkes DL, Wolfe RR, Paddon-Jones D. Aging does not impair the anabolic response to a protein-rich meal. Am J Clin Nutr. 2007;86:451–456
61. https://examine.com/nutrition/whey-vs-soy-weightloss/
62. Birk Y. The Bowman-Birk inhibitor. Trypsin-and chymotrypsin-inhibitor from soybeans. Int J Pept Protein Res. févr 1985;25(2):113-31
63. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6057888/
64. Purpura M, Lowery RP, Joy JM, De Souza EO, Kalman D. A comparison of blood amino acid concentrations following ingestion of rice and whey protein isolate: a double-blind, crossover study. J Nutr Health Sci. 2014;1:306

65. Renan M, Mekmene O, Famelart MH, Guyomarc'h F, Arnoult-Delest V, Paquet D, et al. Ph-dependent behaviour of soluble protein aggregates formed during heat-treatment of milk at ph 6.5 or 7.2. J Dairy Res. 2006;73:79–86
66. Silk DB, Grimble GK, Rees RG. Protein digestion and amino acid and peptide absorption. Proc Nutr Soc. 1985;44:63–72. doi: 10.1079/PNS1985001
67. Morifuji M, Ishizaka M, Baba S, Fukuda K, Matsumoto H, Koga J, et al. Comparison of different sources and degrees of hydrolysis of dietary protein: effect on plasma amino acids, dipeptides, and insulin responses in human subjects. J Agric Food Chem. 2010;58:8788–97
68. Calbet JA, Maclean DA. Plasma glucagon and insulin responses depend on the rate of appearance of amino acids after ingestion of different protein solutions in humans. J Nutr. 2002;132:2174–2182
69. Borgstrom B, Dahlqvist A, Lundh G, Sjovall J. Studies of intestinal digestion and absorption in the human. J Clin Invest. 1957;36:1521–1536. doi: 10.1172/JCI103549
70. Minevich J, Olson MA, Mannion JP, Boublik JH, Mcpherson JO, Lowery RP, et al. Digestive enzymes reduce quality differences between plant and animal proteins: an double-blind crossover study. J Int Soc Sports Nutr. 2015;12(Suppl 1):P26
71. Shimomura Y, Yamamoto Y, Bajotto G, Sato J, Murakami T, Shimomura N, Kobayashi H, Mawatari K. Nutraceutical effects of branched-chain amino acids on skeletal muscle. J Nutr. 2006;136:529S–532S
72. https://academic.oup.com/jn/article/136/2/529S/4664393
73. Suryawan A, et al. A molecular model of human branched-chain amino acid metabolism. *Am J Clin Nutr*. (1998)
74. Shimomura Y, et al. Branched-chain alpha-keto acid dehydrogenase complex in rat skeletal muscle: regulation of the activity and gene expression by nutrition and physical exercise. *J Nutr*. (1995)
75. Howarth KR, et al. Exercise training increases branched-chain oxoacid dehydrogenase kinase content in human skeletal muscle. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*. (2007)
76. Wagenmakers AJ, et al. Exercise-induced activation of the branched-chain 2-oxo acid dehydrogenase in human muscle. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. (1989)
77. Paxton R, Harris RA. Regulation of branched-chain alpha-ketoacid dehydrogenase kinase. *Arch Biochem Biophys*. (1984)

78. Boado RJ, et al. Selective expression of the large neutral amino acid transporter at the blood-brain barrier. *Proc Natl Acad Sci U S A*. (1999)
79. Davis JM, Alderson NL, Welsh RS. Serotonin and central nervous system fatigue: nutritional considerations. *Am J Clin Nutr*. (2000)
80. Nybo L, et al. Neurohumoral responses during prolonged exercise in humans. *J Appl Physiol*. (2003)
81. Blomstrand E, Celsing F, Newsholme EA. Changes in plasma concentrations of aromatic and branched-chain amino acids during sustained exercise in man and their possible role in fatigue. *Acta Physiol Scand*. (1988)
82. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/cphy.cp120122
83. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00716380/document
84. Resistance exercise increases AMPK activity and reduces 4E-BP1 phosphorylation and protein synthesis in human skeletal muscle.
85. http://biochimej.univ-angers.fr/Page2/TexteTD/6ModuleS5BG2/ZsuiteTDS5BG2/3RoleInsulinGlucagon/1RoleInsulinGlucagon.htm
86. Yang J, et al. Leucine stimulates insulin secretion via down-regulation of surface expression of adrenergic α2A receptor through the mTOR (mammalian target of rapamycin) pathway: implication in new-onset diabetes in renal transplantation. *J Biol Chem*. (2012)
87. Doi M, et al. Isoleucine, a potent plasma glucose-lowering amino acid, stimulates glucose uptake in C2C12 myotubes. *Biochem Biophys Res Commun*. (2003)
88. Isoleucine, a blood glucose-lowering amino acid, increases glucose uptake in rat skeletal muscle in the absence of increases in AMP-activated protein kinase activity. *J Nutr*. (2005)
89. Shimomura Y, et al. Suppression of glycogen consumption during acute exercise by dietary branched-chain amino acids in rats. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*. (2000)
90. Falavigna G, et al. Effects of diets supplemented with branched-chain amino acids on the performance and fatigue mechanisms of rats submitted to prolonged physical exercise. *Nutrients*. (2012)
91. Pimentel GD, et al. β-Hydroxy-β-methylbutyrate (HMβ) supplementation stimulates skeletal muscle hypertrophy in rats via the mTOR pathway. *Nutr Metab (Lond)*. (2011)

92. Kornasio R, et al. Beta-hydroxy-beta-methylbutyrate (HMB) stimulates myogenic cell proliferation, differentiation and survival via the MAPK/ERK and PI3K/Akt pathways. *Biochim Biophys Acta*. (2009)
93. Eley HL, Russell ST, Tisdale MJ. Attenuation of depression of muscle protein synthesis induced by lipopolysaccharide, tumor necrosis factor, and angiotensin II by beta-hydroxy-beta-methylbutyrate. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. (2008)
94. Eley HL, Russell ST, Tisdale MJ. Mechanism of attenuation of muscle protein degradation induced by tumor necrosis factor-alpha and angiotensin II by beta-hydroxy-beta-methylbutyrate. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. (2008)
95. Eley HL, et al. Signaling pathways initiated by beta-hydroxy-beta-methylbutyrate to attenuate the depression of protein synthesis in skeletal muscle in response to cachectic stimuli. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. (2007)
96. Aversa Z, et al. β-hydroxy-β-methylbutyrate (HMB) attenuates muscle and body weight loss in experimental cancer cachexia. *Int J Oncol*. (2011)
97. Fitschen PJ, Wilson GJ, Wilson JM, Wilund KR. Efficacy of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate supplementation in elderly and clinical populations. Nutrition. 2013;29:29–36. doi: 10.1016/j.nut.2012.05.005
98. Ardawi MS, Newsholme EA. Glutamine metabolism in lymphocytes of the rat. *Biochem J*. (1983)
99. Kim H. Glutamine as an immunonutrient. *Yonsei Med J*. (2011)
100. Mittendorfer B, et al. Accelerated glutamine synthesis in critically ill patients cannot maintain normal intramuscular free glutamine concentration. *JPEN J Parenter Enteral Nutr*. (1999)
101. http://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/3008/1993_8-9_884.pdf?sequence=1
102. Gleeson M. Dosing and efficacy of glutamine supplementation in human exercise and sport training. *J Nutr*. (2008)
103. Effect of glutamine on leucine metabolism in humans
104. Fujita T, Yanaga K. Association between glutamine extraction and release of citrulline and glycine by the human small intestine. *Life Sci*. (2007)
105. https://examine.com/supplements/citrulline/research/#ref2
106. Tharakan JF, et al. Adaptation to a long term (4 weeks) arginine- and precursor (glutamate, proline and aspartate)-free diet. *Clin Nutr*. (2008)
107. Tangphao O, et al. Pharmacokinetics of intravenous and oral L-arginine in normal volunteers. *Br J Clin Pharmacol*. (1999)

108. Collier SR, Casey DP, Kanaley JA. Growth hormone responses to varying doses of oral arginine. *Growth Horm IGF Res*. (2005)
109. Fahs CA, Heffernan KS, Fernhall B. Hemodynamic and vascular response to resistance exercise with L-arginine. Med Sci Sports Exerc. 2009;41:773–779. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181909d9d
110. Tang JE, Lysecki PJ, Manolakos JJ, MacDonald MJ, Tarnopolsky MA, Phillips SM. Bolus arginine supplementation affects neither muscle blood flow nor muscle
111. protein synthesis in young men at rest or after resistance exercise. J Nutr. 2011;141:195–200. doi: 10.3945/jn.110.130138
112. McConell GK. Effects of L-arginine supplementation on exercise metabolism. Curr Opin Clin Nutr Metab Care. 2007;10:46–51. doi: 10.1097/MCO.0b013e32801162fa
113. Abel T, et al. Influence of chronic supplementation of arginine aspartate in endurance athletes on performance and substrate metabolism - a randomized, double-blind, placebo-controlled study. *Int J Sports Med*. (2005)
114. Colombani PC, et al. Chronic arginine aspartate supplementation in runners reduces total plasma amino acid level at rest and during a marathon run. *Eur J Nutr*. (1999)
115. Tang JE, et al. Bolus arginine supplementation affects neither muscle blood flow nor muscle protein synthesis in young men at rest or after resistance exercise. *J Nutr*. (2011)
116. Kaore SN, Amane HS, Kaore NM. Citrulline: pharmacological perspectives and its role as an emerging biomarker in future. *Fundam Clin Pharmacol*. (2013)
117. Tomlinson C, et al. Arginine synthesis from enteral glutamine in healthy adults in the fed state. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. (2011)
118. van de Poll MC, et al. Intestinal and hepatic metabolism of glutamine and citrulline in humans. *J Physiol*. (2007)
119. Bahri S, et al. Mechanisms and kinetics of citrulline uptake in a model of human intestinal epithelial cells. *Clin Nutr*. (2008)
120. Sureda A, et al. L-citrulline-malate influence over branched chain amino acid utilization during exercise. *Eur J Appl Physiol*. (2010)
121. Source and fate of circulating citrulline
122. Interorgan amino acid exchange in humans: consequences for arginine and citrulline metabolism

123. Callis A, et al. Activity of citrulline malate on acid-base balance and blood ammonia and amino acid levels. Study in the animal and in man. *Arzneimittelforschung*. (1991)

124. Pérez-Guisado J, Jakeman PM. Citrulline malate enhances athletic anaerobic performance and relieves muscle soreness. *J Strength Cond Res*. (2010)

125. Hickner RC, et al. L-citrulline reduces time to exhaustion and insulin response to a graded exercise test. *Med Sci Sports Exerc*. (2006)

126. Bendahan D, Mattei JP, Ghattas B, Confort-Gouny S, Le Guern ME, Cozzone PJ. Citrulline/malate promotes aerobic energy production in human exercising muscle. Br J Sports Med. 2002;36:282–289. doi: 10.1136/bjsm.36.4.282

127. Sureda A, Cordova A, Ferrer MD, Perez G, Tur JA, Pons A. L-citrulline-malate influence over branched chain amino acid utilization during exercise. Eur J Appl Physiol. 2010;110:341–351. doi: 10.1007/s00421-010-1509-4

128. McKinley-Barnard S, et al. Combined L-citrulline and glutathione supplementation increases the concentration of markers indicative of nitric oxide synthesis. *J Int Soc Sports Nutr*. (2015)

129. Role of histidine-related compounds as intracellular proton buffering constituents in vertebrate muscle. *Biochemistry (Mosc)*. (2000)

130. Yeum KJ, et al. Profiling histidine dipeptides in plasma and urine after ingesting beef, chicken or chicken broth in humans. *Amino Acids*. (2010)

131. Drozak J, et al. Molecular identification of carnosine synthase as ATP-grasp domain-containing protein 1 (ATPGD1). *J Biol Chem*. (2010)

132. Tallon MJ, et al. The carnosine content of vastus lateralis is elevated in resistance-trained bodybuilders. *J Strength Cond Res*. (2005)

133. Deldicque L, et al. Kinetics of creatine ingested as a food ingredient. *Eur J Appl Physiol*. (2008)

134. Darrabie M.D., Arciniegas A.J.L., Mishra R., Bowles D.E., Jacobs D.O., Santacruz L. AMPK and substrate availability regulate creatine transport in cultured cardiomyocytes. Am. J. Physiol. Metab. 2011;300:870–876. doi: 10.1152/ajpendo.00554.2010

135. Schlattner U, Tokarska-Schlattner M, Wallimann T. Mitochondrial creatine kinase in human health and disease. *Biochim Biophys Acta*. (2006)

136. Brosnan JT, da Silva RP, Brosnan ME. The metabolic burden of creatine synthesis. *Amino Acids*. (2011)

137. Persky AM, et al. Single- and multiple-dose pharmacokinetics of oral creatine. *J Clin Pharmacol*. (2003)
138. McCall W, Persky AM. Pharmacokinetics of creatine. *Subcell Biochem*. (2007)
139. Hultman E, Greenhaff PL. Skeletal muscle energy metabolism and fatigue during intense exercise in man. *Sci Prog*. (1991)
140. Effects of acute creatine monohydrate supplementation on leucine kinetics and mixed-muscle protein synthesis
141. Safdar A, et al. Global and targeted gene expression and protein content in skeletal muscle of young men following short-term creatine monohydrate supplementation. *Physiol Genomics*. (2008)
142. Jagim AR, et al. A buffered form of creatine does not promote greater changes in muscle creatine content, body composition, or training adaptations than creatine monohydrate. *J Int Soc Sports Nutr*. (2012)
143. Giese MW, Lecher CS. Non-enzymatic cyclization of creatine ethyl ester to creatinine. *Biochem Biophys Res Commun*. (2009)
144. Astorino TA, et al. Is running performance enhanced with creatine serum ingestion. *J Strength Cond Res*. (2005)
145. https://www.lanutrition.fr/tout-savoir-sur-la-maltodextrine
146. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14660478/
147. Codex F.C. Monograph on Isomaltulose. 7th ed. US Pharmacopeial Convention; Rockville, MD, USA: 2010. [Google Scholar]
148. Holub I., Gostner A., Theis S., Nosek L., Kudlich T., Melcher R., Scheppach W. Novel findings on the metabolic effects of the low glycaemic carbohydrate isomaltulose (palatinose) Br. J. Nutr. 2010;103:1730–1737. doi: 10.1017/S0007114509993874
149. Childs E., De Wit H., Wit H. Subjective, behavioral, and physiological effects of acute caffeine in light, nondependent caffeine users. Psychopharmacology. 2006;185:514–523. doi: 10.1007/s00213-006-0341-3
150. Bellar D., Kamimori G.H., Glickman E.L. The Effects of Low-Dose Caffeine on Perceived Pain During a Grip to Exhaustion Task. J. Strength Cond. Res. 2011;25:1225–1228. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181d9901f
151. Williams A.D., Cribb P.J., Cooke M.B., Hayes A. The Effect of Ephedra and Caffeine on Maximal Strength and Power in Resistance-Trained Athletes. J. Strength Cond. Res. 2008;22:464–470. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181660320

152. Pormsila W, Krähenbühl S, Hauser PC. Determination of carnitine in food and food supplements by capillary electrophoresis with contactless conductivity detection. *Electrophoresis*. (2010)
153. Lahjouji K, Mitchell GA, Qureshi IA. Carnitine transport by organic cation transporters and systemic carnitine deficiency. *Mol Genet Metab*. (2001)
154. Evans AM, Fornasini G. Pharmacokinetics of L-carnitine. *Clin Pharmacokinet*. (2003)
155. Rebouche CJ. Quantitative estimation of absorption and degradation of a carnitine supplement by human adults. *Metabolism*. (1991)
156. Vermeulen RC, Scholte HR. Exploratory open label, randomized study of acetyl- and propionylcarnitine in chronic fatigue syndrome. *Psychosom Med*. (2004)
157. Wiseman LR, Brogden RN. Propionyl-L-carnitine. *Drugs Aging*. (1998)
158. Brevetti G, et al. Superiority of L-propionylcarnitine vs L-carnitine in improving walking capacity in patients with peripheral vascular disease: an acute, intravenous, double-blind, cross-over study. *Eur Heart J*. (1992)
159. Bloomer RJ, Smith WA, Fisher-Wellman KH. Glycine propionyl-L-carnitine increases plasma nitrate/nitrite in resistance trained men. *J Int Soc Sports Nutr*. (2007)
160. Eder K, et al. Free and total carnitine concentrations in pig plasma after oral ingestion of various L-carnitine compounds. *Int J Vitam Nutr Res*. (2005)
161. Brandsch C, Eder K. Effect of L-carnitine on weight loss and body composition of rats fed a hypocaloric diet. *Ann Nutr Metab*. (2002)
162. Melton SA, et al. L-carnitine supplementation does not promote weight loss in ovariectomized rats despite endurance exercise. *Int J Vitam Nutr Res*. (2005)
163. Villani RG, et al. L-Carnitine supplementation combined with aerobic training does not promote weight loss in moderately obese women. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*. (2000)
164. Volek JS, et al. L-Carnitine L-tartrate supplementation favorably affects markers of recovery from exercise stress. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. (2002)
165. Kraemer WJ, et al. The effects of L-carnitine L-tartrate supplementation on hormonal responses to resistance exercise and recovery. *J Strength Cond Res*. (2003)
166. Spiering BA, et al. Effects of L-carnitine L-tartrate supplementation on muscle oxygenation responses to resistance exercise. *J Strength Cond Res*. (2008)

167. Stuessi C, et al. L -Carnitine and the recovery from exhaustive endurance exercise: a randomised, double-blind, placebo-controlled trial. *Eur J Appl Physiol*. (2005)

168. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6343764/

169. Churruca I, Fernandez-Quintela A, Portillo MP. Conjugated linoleic acid isomers: differences in metabolism and biological effects. Biofactors. 2009;35:105–11. doi: 10.1002/biof.13. [PubMed] [CrossRef] [Google Scholar]

170. Kishino S, Ogawa J, Omura Y, Matsumura K, Shimizu S. Conjugated linoleic acid production from linoleic acid by lactic acid bacteria. J Am Oil Chem Soc. 2002;70:159–63. doi: 10.1007/s11746-002-0451-4

171. Boschini RP, Garcia Júnior JR. UCP2 and UCP3 genic expression: regulation by food restriction, fasting and physical exercise. Braz J Nutr. 2005;18:753–64

172. Tavares V, Hirata MH, Hirata RDC. Peroxisome proliferator-activated receptor gamma (PPARgamma): molecular study in glucose homeostasis, lipid metabolism and therapeutic approach. Arch Endocrinol Metabol. 2007;51:526–33

173. Peters JM, Park Y, Gonzalez FJ, Pariza MW. Influence of conjugated linoleic acid on body composition and target gene expression in peroxisome proliferator-activated receptor α-null mice. Biochim Biophys Acta. 2001;1533(3):233–42. doi: 10.1016/S1388-1981(01)00155-X

174. Busiello RA, Savarese S, Lombardi A. Mitochondrial uncoupling proteins and energy metabolism. Front Physiol. 2015;6:36. doi: 10.3389/fphys.2015.00036

175. Aubert J, Champigny O, Saint-Marc P, Negrel R, Collins S, Ricquier D, et al. Up-regulation of UCP-2 gene expression by PPAR agonists in preadipose and adipose cells. Biochem Biophys Res Commun. 1997;238:606–11. doi: 10.1006/bbrc.1997.7348

176. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6680710/

177. Nelson J.R., Raskin S. The eicosapentaenoic acid:arachidonic acid ratio and its clinical utility in cardiovascular disease. Postgrad. Med. 2019;131:268–277. doi: 10.1080/00325481.2019.1607414

178. Di Girolamo F.G., Situlin R., Mazzucco S., Valentini R., Toigo G., Biolo G. Omega-3 fatty acids and protein metabolism: Enhancement of anabolic interventions for sarcopenia. [(accessed on 15 June 2019)];Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab Care. 2014 17:145–150. doi: 10.1097/MCO.0000000000000032

179. McGlory C., Wardle S.L., Macnaughton L.S., Witard O.C., Scott F., Dick J., Bell J.G., Phillips S.M., Galloway S.D.R., Hamilton D.L., et al. Fish oil supplementation

suppresses resistance exercise and feeding-induced increases in anabolic signaling without affecting myofibrillar protein synthesis in young men. Physiol. Rep. 2016;4:e12715. doi: 10.14814/phy2.12715

180. Rossato L.T., Schoenfeld B.J., De Oliveira E.P. Is there sufficient evidence to supplement omega-3 fatty acids to increase muscle mass and strength in young and older adults? Clin. Nutr. 2019 doi: 10.1016/j.clnu.2019.01.001

181. Mocking R.J.T., Harmsen I., Assies J., Koeter M.W.J., Ruhé H.G., Schene A.H. Meta-analysis and meta-regression of omega-3 polyunsaturated fatty acid supplementation for major depressive disorder. Transl. Psychiatry. 2016;6:e756. doi: 10.1038/tp.2016.29

182. Miller P.E., Van Elswyk M., Alexander D.D. Long-Chain Omega-3 Fatty Acids Eicosapentaenoic Acid and Docosahexaenoic Acid and Blood Pressure: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. Am. J. Hypertens. 2014;27:885–896. doi: 10.1093/ajh/hpu024

183. Du S., Jin J., Fang W., Su Q. Does Fish Oil Have an Anti-Obesity Effect in Overweight/Obese Adults? A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. PLoS ONE. 2015;10:e0142652. doi: 10.1371/journal.pone.0142652

184. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5023714/

185. Saudan C, et al. Short term impact of Tribulus terrestris intake on doping control analysis of endogenous steroids. *Forensic Sci Int*. (2008)

186. Rogerson S, et al. The effect of five weeks of Tribulus terrestris supplementation on muscle strength and body composition during preseason training in elite rugby league players. *J Strength Cond Res*. (2007)

187. https://examine.com/supplements/zma/

188. Cahier 2 du n°3300 du Moniteur des pharmacies publié le 14 décembre 2019

189. http://www.chups.jussieu.fr/polys/dus/dusmedecinedusport/dupromotionsportetsante2011/DUNS-GP-Depense%20energetique-mars2010pdf.pdf

190. https://www.cerin.org/glossaire/calorie/

191. Hackett D.A., Johnson N.A., Chow C.-M. Training Practices and Ergogenic Aids Used by Male Bodybuilders. J. Strength Cond. Res. 2013;27:1609–1617. doi: 10.1519/JSC.0b013e318271272a

192. https://www.anses.fr/fr/content/les-prot%C3%A9ines

193. Spendlove J, Mitchell L, Gifford J, Hackett D, Slater G, CobleyS, O'Connor H. Dietary Intake of Competitive Bodybuilders. Sports Med. 2015;45:1041–63

194. Morton R.W., Murphy K.T., McKellar S.E., Schoenfeld B.J., Henselmans M., Helms E., Aragon A.A., Devries M.C., Banfield L., Krieger J.W., et al. A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. [(accessed on 25 March 2019)];Br. J. Sports Med. 2018 52:376–384. doi: 10.1136/bjsports-2017-097608

195. Helms ER, Zinn C, Rowlands DS, Brown SR. A systematic review of dietary protein during caloric restriction in resistance trained lean athletes: a case for higher intakes. Int J Sport Nutr Exerc Metab. 2013. Epub ahead of print.

196. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5477153/#CR54

197. Martin WF, Armstrong LE, Rodriguez NR. Dietary protein intake and renal function. Nutr Metab (Lond) 2005;2:25. doi: 10.1186/1743-7075-2-25

198. Poortmans JR, Dellalieux O. Do regular high protein diets have potential health risks on kidney function in athletes? Int J Sport Nutr Exerc Metab. 2000;10:28–38. doi: 10.1123/ijsnem.10.1.28

199. Antonio J, Ellerbroek A, Silver T, Vargas L, Tamayo A, Buehn R, et al. A high protein diet has no harmful effects: a one-year crossover study in resistance-trained males. J Nutr Metab. 2016;2016:9104792.

200. https://nutritionandmetabolism.biomedcentral.com/articles/10.1186/1743-7075-2-19

201. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6704341/

202. Tipton KD, Rasmussen BB, Miller SL, Wolf SE, Owens-Stovall SK, Petrini BE, et al. Timing of amino acid-carbohydrate ingestion alters anabolic response of muscle to resistance exercise. Am J Physiol Endocrinol Metab. 2001;281:E197–206

203. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5350548/

204. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3900340/

205. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9239992/

206. Garlick PJ, Grant I. Amino acid infusion increases the sensitivity of muscle protein synthesis in vivo to insulin. Effect of branched-chain amino acids. Biochem J. 1988;254:579–584

207. Balage M, Dardevet D. Long-term effects of leucine supplementation on body composition. Curr Opin Clin Nutr Metab Care. 2010;13:265–270. doi: 10.1097/MCO.0b013e328336f6b8

208. Pencharz PB, Elango R, Ball RO. Determination of the tolerable upper intake level of leucine in adult men. J Nutr. 2012;142:2220S–2224S. doi: 10.3945/jn.112.160259
209. https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Proteines.pdf
210. Etude de l'IRBMS sur les BCAA. Le moniteur des pharmacies
211. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4700774/
212. Smith HJ, Mukerji P, Tisdale MJ. Attenuation of proteasome-induced proteolysis in skeletal muscle by {beta}-hydroxy-{beta}-methylbutyrate in cancer-induced muscle loss. Cancer Res. 2005;65:277–283
213. Eley HL, Russell ST, Baxter JH, Mukerji P, Tisdale MJ. Signaling pathways initiated by beta-hydroxy-beta-methylbutyrate to attenuate the depression of protein synthesis in skeletal muscle in response to cachectic stimuli. Am J Physiol Endocrinol Metab. 2007;293:E923–E931. doi: 10.1152/ajpendo.00314.2007
214. Rathmacher JA, Nissen S, Panton L, Clark RH, Eubanks May P, Barber AE, D'Olimpio J, Abumrad NN. Supplementation with a combination of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate (HMB), arginine, and glutamine is safe and could improve hematological parameters. JPEN J Parenter Enteral Nutr. 2004;28:65–75. doi: 10.1177/014860710402800265
215. Nissen S, Sharp RL, Panton L, Vukovich M, Trappe S, Fuller JC Jr. beta-hydroxy-beta-methylbutyrate (HMB) supplementation in humans is safe and may decrease cardiovascular risk factors. J Nutr. 2000;130:1937–1945
216. Gallagher PM, Carrithers JA, Godard MP, Schulze KE, Trappe SW. Beta-hydroxy-beta-methylbutyrate ingestion, part II: effects on hematology, hepatic and renal function. Med Sci Sports Exerc. 2000;32:2116–2119. doi: 10.1097/00005768-200012000-00023
217. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3568064/
218. Effect of glutamine on leucine metabolism in humans
219. Bowtell JL, et al. Effect of oral glutamine on whole body carbohydrate storage during recovery from exhaustive exercise. *J Appl Physiol*. (1999)
220. Camilleri M, Madsen K, Spiller R, Van Meerveld BG, Verne GN. Intestinal barrier function in health and gastrointestinal disease. Neurogastroenterol Motil. 2012;24:503–512. doi: 10.1111/j.1365-2982.2012.01921.x.
221. Shao A, Hathcock JN. Risk assessment for the amino acids taurine, L-glutamine and L-arginine. *Regul Toxicol Pharmacol*. (2008)

222. Fahs CA, Heffernan KS, Fernhall B. Hemodynamic and vascular response to resistance exercise with L-arginine. Med Sci Sports Exerc. 2009;41:773–779. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181909d9d

223. Tang JE, Lysecki PJ, Manolakos JJ, MacDonald MJ, Tarnopolsky MA, Phillips SM. Bolus arginine supplementation affects neither muscle blood flow nor muscle protein synthesis in young men at rest or after resistance exercise. J Nutr. 2011;141:195–200. doi: 10.3945/jn.110.130138

224. Volpi E, Kobayashi H, Sheffield-Moore M, Mittendorfer B, Wolfe RR. Essential amino acids are primarily responsible for the amino acid stimulation of muscle protein anabolism in healthy elderly adults. Am J Clin Nutr. 2003;78:250–258

225. Collier SR, Casey DP, Kanaley JA. Growth hormone responses to varying doses of oral arginine. *Growth Horm IGF Res*. (2005)

226. Wax B., Kavazis A.N., Luckett W. Effects of Supplemental Citrulline-Malate Ingestion on Blood Lactate, Cardiovascular Dynamics and Resistance Exercise Performance in Trained Males. [(accessed on 25 March 2019)];J. Diet. 2016 13:269–282. doi: 10.3109/19390211.2015.1008615

227. Wax B., Kavazis A.N., Weldon K., Sperlak J. Effects of Supplemental Citrulline Malate Ingestion During Repeated Bouts of Lower-Body Exercise in Advanced Weightlifters. J. Strength Cond. Res. 2015;29:786–792. doi: 10.1519/JSC.0000000000000670

228. Glenn J.M., Gray M., Wethington L.N., Stone M.S., Stewart R.W., Jr., Moyen N.E. Acute citrulline malate supplementation improves upper- and lower-body submaximal weightlifting exercise performance in resistance-trained females. [(accessed on 25 March 2019)];Eur. J. Nutr. 2017 56:775–784. doi: 10.1007/s00394-015-1124-6.

229. Trexler E.T., Persky A.M., Ryan E.D., Schwartz T.A., Stoner L., Smith-Ryan A.E. Acute Effects of Citrulline Supplementation on High-Intensity Strength and Power Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis. Sports Med. 2019;49:707–718. doi: 10.1007/s40279-019-01091-z

230. Hobson R.M., Saunders B., Ball G., Harris R.C., Sale C. Effects of β-alanine supplementation on exercise performance: A meta-analysis. Amino Acids. 2012;43:25–37. doi: 10.1007/s00726-011-1200-z

231. Hoffman J., Ratamess N., Kang J., Mangine G., Faigenbaum A., Stout J. Effect of creatine and β-alanine supplementation on performance and endocrine

responses in strength/power athletes. [(accessed on 25 March 2019)];Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab. 2006 16:430–446. doi: 10.1123/ijsnem.16.4.430.

232. Hobson RM, Saunders B, Ball G, Harris RC, Sale C. Effects of beta-alanine supplementation on exercise performance: a meta-analysis. . Amino Acids. 2012;43:25–37. doi: 10.1007/s00726-011-1200-z

233. Harris RC, et al. The absorption of orally supplied beta-alanine and its effect on muscle carnosine synthesis in human vastus lateralis. *Amino Acids*. (2006)

234. Nawrot P, Jordan S, Eastwood J, Rotstein J, Hugenholtz A, Feeley M. Effects of caffeine on human health. Food Addit Contam. 2003;20:1–30

235. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15320650/

236. Hultman E., Söderlund K., Timmons J.A., Cederblad G., Greenhaff P.L. Muscle creatine loading in men. [(accessed on 25 March 2019)];J. Appl. Physiol. Soc. 1996 81:232–237. doi: 10.1152/jappl.1996.81.1.232

237. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5409720/

238. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6566225/

239. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/mus.880140703

240. Gaullier JM, Halse J, Hoye K, Kristiansen K, Fafertun H, Vik H, et al. Supplementation with conjugated linoleic acid for 24 months is well tolerated by and reduces body fat mass in healthy, overweight humans. J Nutr. 2005;135:778–84

241. Kennedy A, Martinez K, Chung S, LaPoint K, Hopkins R, Schmidt SF, et al. Inflammation and insulin resistance induced by trans-10, cis-12 conjugated linoleic acid depend on intracellular calcium levels in primary cultures of human adipocytes. J Lipid Res. 2010;51:1906–17. doi: 10.1194/jlr.M005447

242. Funck LG, Barrera-Arellano D, Block JM. Conjugated linoleic acid (CLA) and its relationship with cardiovascular disease and associated risk factors. Arch Latinoam Nutr. 2006;56:123–34

243. Wendel AA, Purushotham A, Liu LF, Belury MA. Conjugated linoleic acid fails to worsen insulin resistance but induces hepatic steatosis in the presence of leptin in ob/ob mice. J Lipid Res. 2008;49:98–106. doi: 10.1194/jlr.M700195-JLR200

244. Kennedy A, Overman A, Lapoint K, Hopkins R, West T, Chuang CC, et al. Conjugated linoleic acid-mediated inflammation and insulin resistance in human adipocytes are attenuated by resveratrol. J Lipid Res. 2009;50(2):225–32. doi: 10.1194/jlr.M800258-JLR200

245. https://www.anses.fr/fr/content/compl%C3%A9ments-alimentaires-destin%C3%A9s-aux-sportifs-des-risques-pour-la-sant%C3%A9-pour-des-b%C3%A9n%C3%A9fices
246. https://vigilanses.anses.fr/sites/default/files/VigilansesN1_compl%C3%A9mentsalimentairesetsportifs_1.pdf
247. Frederic Delavier, Michael Gundill. Guide des compléments alimentaires pour sportifs. Ed. Vigot. Page 76
248. Rozenek R., Ward P., Long S., Garhammer J. Effects of high-calorie supplements on body composition and muscular strength following resistance training. J. Sports Med. Phys. Fit. 2002;42:340–347
249. Garthe I., Raastad T., Refsnes P.E., Sundgot-Borgen J. Effect of nutritional intervention on body composition and performance in elite athletes. Eur. J. Sport Sci. 2013;13:295–303. doi: 10.1080/17461391.2011.643923
250. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4033492/
251. Ray S., Sale D.G., Lee P., Garner S., MacDougall J.D., McCartney N. Muscle Substrate Utilization and Lactate Production During Weightlifting. Can. J. Appl. Physiol. 1999;24:209–215
252. Tesch P.A., Colliander E.B., Kaiser P. Muscle metabolism during intense, heavy-resistance exercise. Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol. 1986;55:362–366. doi: 10.1007/BF00422734
253. Pascoe D.D., Costill D.L., Fink W.J., Robergs R.A., Zachwieja J.J. Glycogen resynthesis in skeletal muscle following resistive exercise. Med. Sci. Sports Exerc. 1993;25:349. doi: 10.1249/00005768-199303000-00009
254. Trexler E, Smith-Ryan A, Norton L. Metabolic adaptation to weight loss: implications for the athlete. J Int Soc Sport Nutr. 2014;11:7. doi: 10.1186/1550-2783-11-7
255. Sallinen J, Pakarinen A, Ahtiainen J, Kraemer WJ, Volek JS, Häkkinen K. Relationship between diet and serum anabolic hormone responses to heavy-resistance exercise in men. Int J Sports Med. 2004;25:627–633. doi: 10.1055/s-2004-815818
256. Maestu J, Eliakim A, Jurimae J, Valter I, Jurimae T. Anabolic and catabolic hormones and energy balance of the male bodybuilders during the preparation for the competition. J Strength Cond Res. 2010;24:1074–1081. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181cb6fd3.

257. Essen-Gustavsson B, Tesch PA. Glycogen and triglyceride utilization in relation to muscle metabolic characteristics in men performing heavy-resistance exercise. Eur J Appl Physiol. 1990;61:5–10. doi: 10.1007/BF00236686

258. Goedecke JH, Gibson ASC, Grobler L, Collins M, Noakes TD, Lambert EV. Determinants of the variability in respiratory exchange ratio at rest and during exercise in trained athletes. Am J Physiol Endocrinol Metab. 2000;279:E1325–E1334

259. Cornier MA, Donahoo WT, Pereira R, Gurevich I, Westergren R, Enerback S, Eckel PJ, Goalstone ML, Hill JO, Eckel RH, Draznin B. Insulin sensitivity determines the effectiveness of dietary macronutrient composition on weight loss in obese women. Obes Res. 2005;13:703–709. doi: 10.1038/oby.2005.79

260. Phillips SM, Van Loon LJ. Dietary protein for athletes: from requirements to optimum adaptation. J Sports Sci. 2011;29(Suppl 1):S29–S38

Université de Lille

Faculté de Pharmacie de Lille

3 rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX
☎ 03.20.96.40.40
http://pharmacie.univ-lille2.fr/

DEMANDE D'AUTORISATION DE SOUTENANCE

Nom et Prénom de l'étudiant : CREUPELANDT thibault INE : 0990302929 4F

Date, heure et lieu de soutenance :

Le |1|5| |1|0| |2|0|2|0| à 18 h 30. Amphithéâtre ~~ou salle~~ : Pauling
jour mois année

Engagement de l'étudiant - Charte de non-plagiat

J'atteste sur l'honneur que tout contenu qui n'est pas explicitement présenté comme une citation est un contenu personnel et original.

REÇU le 15 SEP. 2020 Rép:

Signature de l'étudiant :

Avis du directeur de thèse

Nom : GERVOIS Prénom : philippe

☑ Favorable

☐ Défavorable

Motif de l'avis défavorable :.....

.....

REÇU le 15 SEP. 2020 Rép:

Date : 15-09-2020
Signature:

Avis du président du jury

Nom : GERVOIS Prénom : philippe

☑ Favorable

☐ Défavorable

Motif de l'avis défavorable :.....

.....

Date : 15-09-2020
Signature:

Décision du Doyen

☒ Favorable

☐ Défavorable

Le 18/09/2020

Le Doyen

B. DÉCAUDIN

NB : La faculté n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans les thèses, qui doivent être regardées comme propres à leurs auteurs.

NA/ 2018

Université de Lille

FACULTE DE PHARMACIE DE LILLE

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

Année Universitaire 2019/2020

Nom : CREUPELANDT

Prénom : Thibault

Titre de la thèse : COMPLEMENTS ALIMENTAIRES, PRODUITS POUR SPORTIFS ET BASE DE LA NUTRITION CHEZ LE CULTURISTE

Mots-clés : Sport, sportif, culturisme, bodybuilding, musculation, hypertrophie musculaire, supplémentation, nutrition, protéines, compléments alimentaires, produits pour sportifs, conseils

---

Résumé : La pratique du culturisme pluri-hebdomadaire liée à une alimentation saine est un mode de vie de plus en plus adopté par les populations jeunes en France. Ce style de vie est largement relayé via les réseaux sociaux où on y retrouve bien souvent des compléments à l'alimentation pour favoriser l'hypertrophie musculaire et les performances physiques. Cependant, très peu sont informés ou s'informent sur les mécanismes d'action et la réelle efficacité des produits. En tant que pharmacien d'officine, susceptible de conseiller ce genre de produits, et en regard de leur succès grandissant, il est important de faire un point sur les connaissances actuelles, la pertinence d'utilisation et les recommandations via un travail de recherche bibliographique.

<u>Membres du jury</u> :

Président : GERVOIS Philippe, Professeur de biochimie, Faculté de Pharmacie de Lille

Assesseur : BORDAGE Simon, Maitre de Conférences, Faculté de Pharmacie de Lille

Membre extérieur : BOEYAERT Timothée, Docteur en Pharmacie, Pharmacie RAJAN