

Faculté de Pharmacie 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>

THESE POUR LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

**Soutenue publiquement le 05/10/2018
Par MR PAT Harold**

LES BESOINS PROTEIQUES DU SPORTIF DE FORCE ET SUPPLEMENTATION

Membres du jury :

Président : HENNEBELLE Thierry, Professeur, Faculté de Pharmacie de Lille

Directeur, conseiller de thèse : HENNEBELLE Thierry, Professeur, Faculté de Pharmacie de Lille

Assesseur(s) : ROUMY Vincent, Maitre de Conférence, Faculté de Pharmacie de Lille
DESCAMPS Antoine, Pharmacien, Pharmacie LIEVENS

**THESE
POUR LE DIPLOME D'ETAT
DE DOCTEUR EN PHARMACIE**

**Soutenue publiquement le 05/10/2018
Par MR PAT Harold**

**LES BESOINS PROTEIQUES DU SPORTIF DE FORCE ET
SUPPLEMENTATION**

Membres du jury :

Président : HENNEBELLE Thierry, Professeur, Faculté de Pharmacie de Lille

Directeur, conseiller de thèse : HENNEBELLE Thierry, Professeur, Faculté de Pharmacie de Lille

Assesseur(s) : ROUMY Vincent, Maitre de Conférence, Faculté de Pharmacie de Lille
DESCAMPS Antoine, Pharmacien, Pharmacie LIEVENS

Faculté de Pharmacie 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

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon Directeur de thèse Monsieur le Professeur Thierry HENNEBELLE également Président du jury de soutenance. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé tout au long de ce travail.

Je remercie également, Monsieur ROUMY, Maître de conférence, d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Merci à Antoine, qui a accepté d'être, pour la première fois, membre de jury d'une thèse. C'est avec honneur que je te compte parmi ces membres.

Je dédie cette thèse à mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je leur suis redevable d'une éducation dont je suis fier et espère qu'ils trouvent, dans la réalisation de mon travail, l'aboutissement de leurs efforts.

A mes frères, Amaury, Jo et Ronan, pour leurs encouragements et pour tout l'amour qu'ils m'apportent.

Merci à mes amis, pour ces années passées à vos côtés, que ce soit sur les bancs des amphithéâtres, à la BU, ou en soirées. Guilhem compagnon de guerre, Adrien qui nous a quitté (trop tôt) pour Tours et Clément pour son amitié indéfectible depuis le collège.

Je tiens à remercier la Pharmacie Lievens, spécialement les titulaires Aurélie et Cédric Lievens, ainsi que l'ensemble de l'équipe (Stéphanie, les deux Antoine, Cédric, Clémence, Lydie...) qui m'ont fait part de leur expérience et grâce à qui j'ai acquis beaucoup de mes connaissances dans ce métier de pharmacien.

Merci à mes futurs beaux-parents et futures belles sœurs (ça arrivera bien un jour) de me soutenir tous les dimanches autour de bons repas.

Enfin, je remercie plus personnellement, Clara qui m'a soutenu et encouragé dans la rédaction de cette thèse. Mais qui me soutient depuis bien plus longtemps maintenant (6 ans 9 mois et 6 jours... Oui oui j'ai compté).

À toutes ces personnes, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.



Faculté de Pharmacie de Lille

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

☎ 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	EI Moukhtar	Parasitologie
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Physique
M.	BERTHELOT	Pascal	Onco et Neurochimie
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie – Pharmacie clinique
M.	CHAVATTE	Philippe	ICPAL
M.	COURTECUISSÉ	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.	SERGHÉRAERT	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

INTRODUCTION

1	LES PROTEINES	17
1.1	GENERALITES	17
1.1.1	Définition	17
1.1.2	Classification	17
1.1.3	Voies métaboliques de synthèse des acides aminés	20
1.1.4	Structures	21
1.2	ROLES DES PROTEINES	24
1.3	METABOLISME	25
1.3.1	Synthèse protéique	26
1.3.2	Dégradation des protéines	28
1.3.3	Utilisation des acides aminés dans les voies oxydatives	30
1.3.4	Synthèse de novo des acides aminés non essentiels	32
1.3.5	Régulation du métabolisme protéique	33
1.4	RECOMMANDATIONS	39
2	LE SPORTIF DE FORCE	41
2.1	GENERALITES	41
2.1.1	Structure et niveau d'organisation du muscle squelettique	41
2.1.2	La contraction musculaire	42
2.1.3	Caractéristiques fonctionnelles	43
2.1.4	Classification des fibres musculaires	45
2.2	LES FILIERES ENERGETIQUES	48
2.2.1	Filière Anaérobie alactique	48
2.2.2	Filière Anaérobie lactique	48
2.2.3	Filière Aérobie	49
2.3	ADAPTATION A L'ENTRAINEMENT ANAEROBIE (FORCE)	50
2.4	DES BESOINS PROTEIQUES SPECIFIQUES	53
2.5	METABOLISME DU SPORTIF DE FORCE	56
2.5.1	Synthèse et Protéolyse musculaire	58
2.5.2	Effets des entraînements de musculation sur les hormones anabolisantes	60
2.5.3	Besoins quantitatifs	61
2.5.4	Besoins qualitatifs	64
3	SUPPLEMENTATION PROTEIQUE	72
3.1	LEGISLATION	72
3.2	LES NORMES EXISTANTES	74
3.2.1	Qualité de fabrication (en usine)	74
3.2.2	Qualité du produit	79
3.3	LA CONSOMMATION DE COMPLEMENTES ALIMENTAIRES	80
3.4	LES PROTEINES ANIMALES	81
3.4.1	Protéines issues du lait	81
3.4.2	Les autres protéines animales	92
3.5	LES PROTEINES VEGETALES	94
3.5.1	Le Soja	95
3.5.2	Le riz	98
3.6	Y-A-T-IL UN MOMENT IDEAL POUR CONSOMMER CES SUPPLEMENTS PROTEIQUES	103
3.7	QUELLE QUANTITE CONSOMMER ?	105
3.8	QUELLES SONT LES PREUVES DE LEUR EFFICACITE ?	106
3.9	QUEL SUPPLEMENT CHOISIR ?	107
3.10	EFFET DE LA SUPPLEMENTATION ET DE L'ENTRAINEMENT	110
3.11	QUELQUES EXEMPLES DE SUPPLEMENTS PROTEIQUES	112
3.11.1	Généralités	112
3.11.2	Isolat de Lactosérum	114
3.11.3	Isolat de Soja	116

CONCLUSION

INTRODUCTION

Les protéines appartiennent au groupe des macronutriments comprenant également, les glucides et les lipides.

Les protéines de par les besoins qualitatif et quantitatif sont des questions majeures pour la population et encore plus pour les sportifs, qui ont fait l'objet de différents rapports par l'Agence Nationale de sécurité du médicament et des produits de santé, anciennement AFFSAPS et sont à la base de plus en plus d'études.

Le besoin en protéines apparait comme un débat sans fin, entre les protecteurs des animaux, les industriels, les raisons scientifiques, les idéaux sur la qualité des protéines animales et végétales. En 2018, l'avis sur l'utilisation de supplémentation protéique reste encore partagé quant à l'utilité

Après avoir compris ce qu'était une protéine et les rôles clés qu'elles ont pour le corps humain, il sera vu le métabolisme détaillé entre synthèse, dégradation et régulation.

Le sportif de force possède une anatomie et une physiologie différente d'un sujet non sportif ou d'un sujet sportif d'endurance. Entre hypertrophie, filière énergétiques et adaptation à l'entraînement, tous ces changements font, que les besoins quantitatif et qualitatif seront sans nul doute augmentés. L'évaluation sera permise par l'existence de facteurs.

En 2009, une étude américaine a étudié l'utilisation ou non de de complément alimentaire(1) chez plus de 1000 sportifs dans plus de 50 salles de sport, il en résulte que plus de la moitié des personnes en consommaient. Cette consommation n'a fait qu'augmenter depuis. La législation permet un cadre plus strict de nos jours, avec des normes à respecter en fabrication et en qualité.

Comme pour l'alimentation, les industriels ont réussi à extraire des sources végétales et des sources animales les protéines et ainsi les concentrés sous forme de poudre. Cette solution, est utilisée par bons nombres de sportifs tant par sa simplicité que par les propriétés intéressantes connues.

1 LES PROTEINES

1.1 Généralités

1.1.1 Définition

Les protéines du grec « *protos* » qui signifie « primordial, primitif » sont des polypeptides, c'est à dire des polymères non branchés d'acides aminés (AA) constitués de deux fonctions chimique : une fonction amine (NH_2) et une fonction acide carboxylique (COOH). On parle de peptides pour les formations avec moins de 50 acides aminés et on parle de polypeptides quand on dépasse ce seuil et que l'on reste en dessous des 100 peptides, les protéines sont formées par l'union de plus de 100 AA. Seul vingt acides aminés sont constitutifs des protéines sur presque 500 acides aminés connus, ils sont appelés acides aminés protéinogènes. Ces AA sont reliés par des liaisons peptidiques et se différencient par les groupements « R » (Figure 1), ils sont tous lévogyres. Dans l'organisme les muscles, l'intestin, le foie et la peau sont les organes de réserve les plus importants.

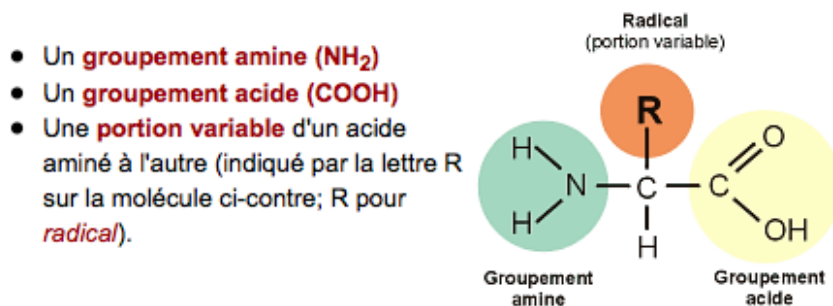


Figure 1: Schéma représentatif de la constitution d'un acide aminé

1.1.2 Classification

On retrouve deux familles, la première dites des acides aminés « essentiels » c'est à dire ceux ne pouvant être synthétisés dans l'organisme à des quantités suffisantes pour satisfaire des besoins et donc obligatoirement apporté par l'alimentation au nombre de huit,

avec l'isoleucine, la leucine, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, le tryptophane, la valine, un dernier est essentiel uniquement chez l'enfant et la personne âgée avec l'histidine qui se rajoute à la liste (Figure). Leur caractère essentiel a été découvert par le biochimiste américain William Cumming Rose.

La seconde famille est dit « non essentiels » avec une synthèse possible par l'organisme avec l'arginine, l'acide aspartique (aspartate), la cystéine, l'acide glutamique (glutamate), la glutamine, la glycine, l'ornithine, la proline, la sérine, l'alanine, l'asparagine et la tyrosine (1).

Cette classification en ces deux familles a été définie dans les années 1950, ce concept est remis en cause avec l'évolution des connaissances par l'appellation acide aminée conditionnellement essentielle (2) comme par exemple avec la glutamine, la cystéine et l'arginine. Ils sont synthétisés par l'organisme mais dans certaines conditions cette synthèse *de novo* ne suffit plus à assouvir les besoins de l'organisme ou dans certaines situations où le système enzymatique est encore immature (ex : nourrisson).

Trois acides aminés sont très importants chez le sportif, de par leur forte concentration dans les muscles (plus de 30%). Il s'agit des BCAA appelé Acides aminés à chaînes ramifiées provenant de l'anglais Branched Chain Amino Acid. La Leucine, l'Isoleucine et la Valine.

La leucine est une molécule couramment appelée « molécule signal » qui agit sur l'activation de l'anabolisme musculaire à travers la voie mTOR. Une concentration plus importante de leucine dans le sang provoquera une forte augmentation de la synthèse des protéines musculaires (3) et une action directe sur l'initiation de la traduction.

Aliphatic side chains		
Glycine	Gly	$\text{H}-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Alanine	Ala	$\text{CH}_3-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Valine ^a	Val	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
Leucine ^a	Leu	$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
Isoleucine ^a	Ile	$\begin{array}{c} \text{CH}_3-\text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$
Aromatic side chains		
Phenylalanine	Phe	$\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Tyrosine	Tyr	$\text{HO}-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Tryptophan	Trp	$\text{C}_8\text{H}_7\text{N}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Hydroxyl groups in side chains		
Serine	Ser	$\text{CH}_2-\underset{\text{OH}}{\text{C}}-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Threonine	Thr	$\text{CH}_3-\underset{\text{OH}}{\text{C}}-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Sulfur-containing side chains		
Cysteine ^b	Cys	$\text{HS}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Methionine	Met	$\text{CH}_3-\text{S}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Imino Acids		
Proline ^c	Pro	$\begin{array}{c} \text{CH}_2-\text{CH}_3 \\ \quad \\ \text{CH}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \quad \\ \text{CH}_2-\text{N} \end{array}$
Acidic side chains and their amides		
Glutamic acid	Glu	$\text{HOOC}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Glutamine	Gln	$\text{H}_2\text{N}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Aspartic acid	Asp	$\text{HOOC}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Asparagine	Asn	$\text{H}_2\text{N}-\overset{\text{O}}{\parallel}{\text{C}}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Basic side chains		
Lysine	Lys	$\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Arginine	Arg	$\text{H}_2\text{N}-\overset{\text{H}}{\underset{\text{NH}}{\text{C}}}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$
Histidine	His	$\text{C}_5\text{H}_4\text{N}-\text{CH}_2-\underset{\text{NH}_2}{\text{C}}-\text{COOH}$

Image 1: Liste des 20 acides aminés protéinogènes et de leur formule organique

Il existe des recommandations de consommation pour chaque acide aminé faites par l'ANSES.

	mg/kg/j
Leucine	39
Isoleucine	18
Lysine	30
Threonine	16
Méthionine	15
Valine	18
Tryptophane	4
Tyrosine, Phenylalanine	27
Histidine	11

Tableau 1: Recommandations de consommation en acides aminés en fonction du poids (pour un adulte)

Source : Agence Française de sécurité sanitaire des aliments (AFSSA) (4)

1.1.3 Voies métaboliques de synthèse des acides aminés

Pour pouvoir synthétiser ces acides aminés il existe six voies métaboliques distinctes :

- l'alpha cétooglutarate (intermédiaire du cycle de Krebs) va fournir du glutamate (c'est l'acide alpha cétonique), qui lui est précurseur de la glutamine, de la proline et de l'arginine.
- le 3 phospho glycérate (intermédiaire provenant de la glycolyse) va donner la sérine et cette sérine va être précurseur d'AA tels que la cystéine et la glycine.
- l'oxaloacétate (intermédiaire du cycle de Krebs) va donner l'aspartate ou l'acide aspartique qui lui est précurseur de l'asparagine, la méthionine, la thréonine (de laquelle dérive l'isoleucine) et la lysine.

– phosphoénolpyruvate et érythrose-4-phosphate (intermédiaire de la voie des pentoses phosphates) sont les précurseurs de la phénylalanine (qui va donner la tyrosine), la tyrosine et le tryptophane.

– le pyruvate (produit final de la glycolyse) va donner l'alanine, la valine et la leucine.

– le ribose-5-phosphate (intermédiaire de la voie des pentoses phosphates) va donner l'histidine.

1.1.4 Structures

On pourrait comparer la structure d'une protéine à un collier de perles où ces dernières seraient les acides aminés. La séquence détermine la structure primaire de la protéine, la configuration de la chaîne peptidique dans l'espace détermine les structures secondaires et tertiaires, l'association de plusieurs chaînes peptidiques détermine la structure quaternaire. Par convention, une protéine comportant moins de 50 acides aminés est appelée peptide, cet usage tend cependant à disparaître et le terme protéine est utilisé même pour de courts peptides. La taille d'une protéine est extrêmement variable de quelques centaines à plusieurs millions de kilo-daltons.

La structure des protéines se décompose en quatre parties comme cité précédemment. La structure primaire qui correspond à la séquence en acide aminés commençant toujours par un groupement amine (NH_2) libre et finissant par une fonction carboxylique (COOH) terminale.

La structure secondaire avec les repliements dans l'espace en hélice alpha le plus souvent ou en feuillet beta de la structure primaire, ces conformations sont déterminées par les liaisons peptidiques et par les interactions entre acides aminés proches mais non voisins.

La structure tertiaire est le résultat de diverses liaisons faibles comme les liaisons hydrogènes, ou plus fortes avec des liaisons covalentes ou encore électrostatiques entre des

acides aminés éloignés dans l'espace de la même chaîne peptidique, ces divers repliements résultent en la formation de sites actifs.

La structure quaternaire et finale des protéines est constituée de plusieurs chaînes polypeptidiques avec des liaisons faibles ou fortes (comme avec la structure tertiaire) l'interaction est indispensable au bon fonctionnement de ces complexes volumineux. Cette dernière structure n'est pas atteinte par toutes les protéines (5).

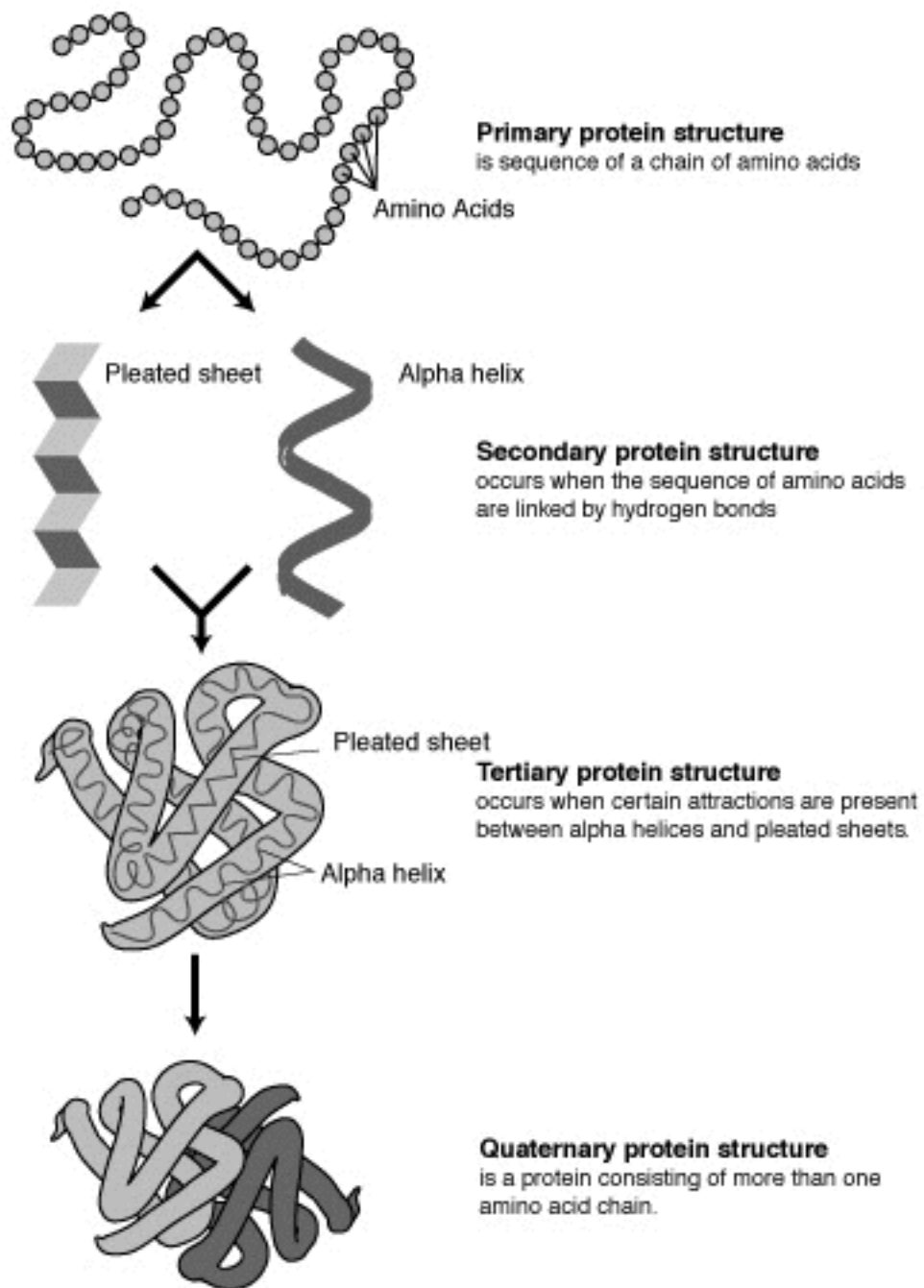


Figure 2: Schéma des quatre structures d'une protéine dans l'espace

1.2 Rôles des protéines

Les protéines ont de très nombreuses fonctions. Un premier rôle principal structurel avec la construction et la réparation des tissus des corps humains avec les protéines de structure (collagène...), protéines contractiles (myosine...). Un second rôle principal biochimique avec les protéines de transport (albumine...), protéines immunitaires (immunoglobulines), protéines enzymatiques, hormones, récepteurs, etc. Bien que ces structures et fonctions sont très variables, les protéines cellulaires et plasmatiques ont un renouvellement permanent tout le long de la vie (6).

Le pool des acides aminés et le pool des protéines sont en équilibre dynamique, grâce à l'apport exogène alimentaire, l'apport *de novo* et par le catabolisme protéique. On peut parler du bilan azoté qui correspond à la différence entre les entrées et les sorties d'azotes de l'organisme. Pour une personne en bonne santé et avec une bonne alimentation, ce bilan est stable et donc que la masse protéique du corps est constant. L'absence d'au moins un seul acide aminé essentiel entrainera un bilan azoté négatif, où les sorties d'azotes seront plus importantes que les entrées avec au final une érosion de la masse protéique (dans les situations d'agressions : brûlures...) Chez les enfants en pleine croissance par exemple ce bilan sera positif, il traduit l'accrétion protéique.

Comme pour le concept des acides aminés essentiel, ce concept de bilan azoté a de nombreuses limites. En effet, il est impossible de mesurer très précisément les entrées et les sorties d'azote. La qualité des protéines ingérées (animales ou végétales) peut faire changer la concentration en azote.(7) Le nouveau modèle d'exploration du métabolisme protéique est le modèle L-[1-¹³C] leucine.

Qui se traduit par la perfusion en intraveineuse de ¹³C-Leucine chez un sujet chez qui on fera deux prélèvements. Le premier qui va mesurer l'enrichissement du VCO₂ par spectrométrie de masse isotopique. Le second par un prélèvement sanguin afin de mesurer l'enrichissement plasmatique en ¹³C-céto-leucine

La première fonction des acides aminés est d'entrer dans la synthèse des protéines, ils sont des substrats énergétiques grâce à leur oxydation. Ils sont également précurseurs d'hormones comme le tryptophane qui donnera de la Sérotonine, précurseurs de neuromédiateurs (GABA), précurseur de médiateur avec l'arginine qui donnera du monoxyde d'azote radicalaire (NO*)

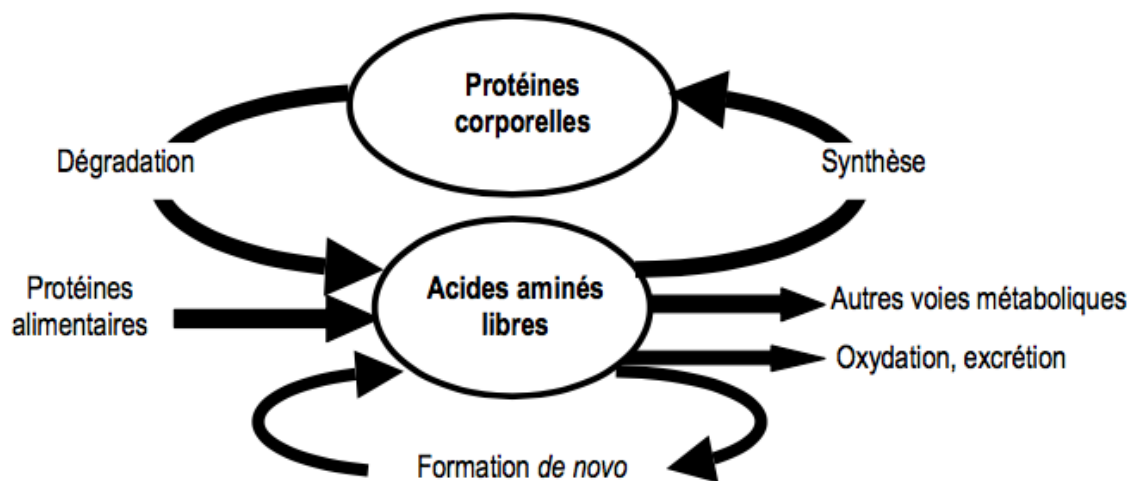


Figure 3: Schéma général de l'homéostasie des acides aminés

1.3 Métabolisme

Le métabolisme protéique oscille entre phase anabolique (post prandiale) et phase catabolique (à jeun) avec un renouvellement incessant (300 g/j) (8) par des processus biochimiques consommant de l'énergie. Cet équilibre est responsable de la conservation de la masse protéique. Il peut être rompu en fonction de l'importance de la dégradation ou de la synthèse avec pour résultat une augmentation ou une diminution de la masse protéique. Au cours d'une activité physique, le catabolisme protéique se produit quand les réserves glucidiques sont insuffisantes.

Ce métabolisme est modulé par divers facteurs nutritionnels (jeûne) et hormonaux ainsi que par des situations pathologiques (syndrome inflammatoire, traumatisme) .

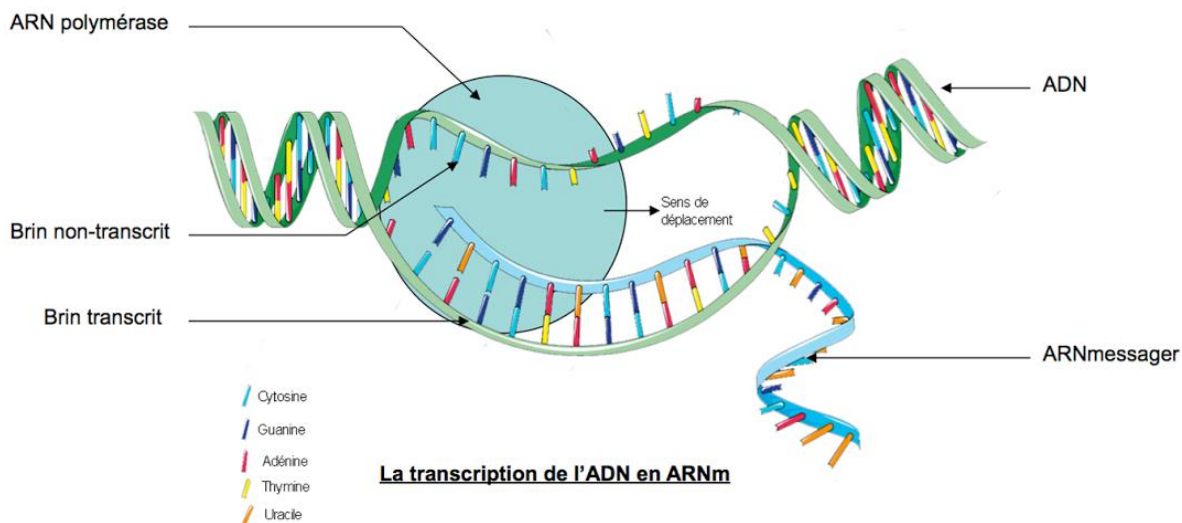
Chez une personne adulte de 70 kg en bonne santé, les protéines représentent un peu plus de 10 kg, réparti à 42% dans le muscle squelettique, 15% dans la peau et 10% dans le foie et l'intestin.

1.3.1 Synthèse protéique

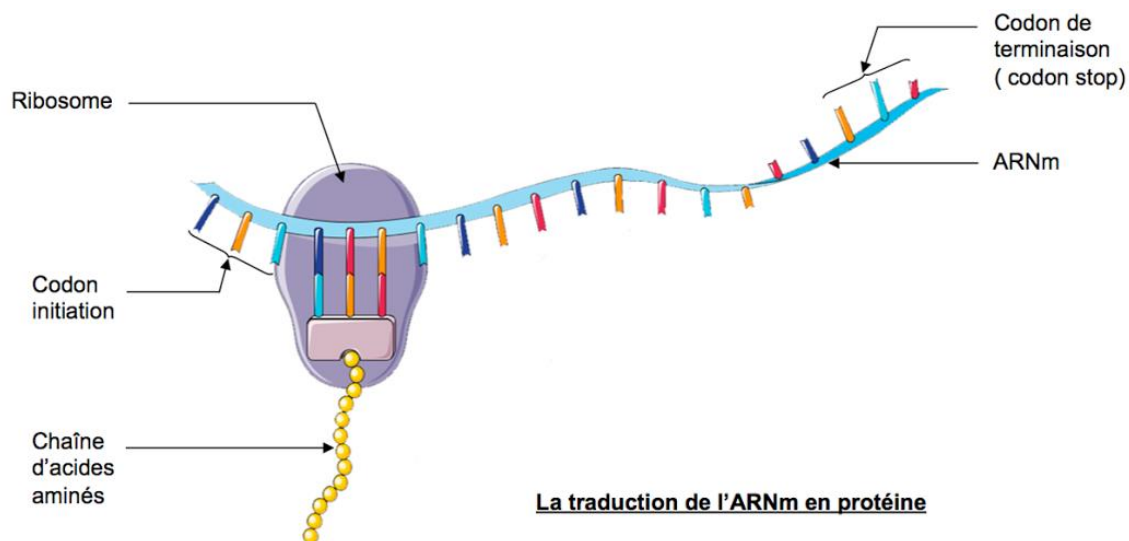
La synthèse est une étape consommant énormément d'énergie (0,85 kCal/g de protéine), elle se fait à partir d'un pool d'acides aminés libres surtout intracellulaire (95%) et le reste extracellulaire. Ces acides aminés seront codés par un codon (suite de trois nucléotides) et qui donnera les propriétés de ce dernier(9).

On va décrire cette synthèse en 6 étapes(5) :

- La transcription (= la copie) de certaines parties spécifiques de l'ADN en ARN messenger (ARNm) (=vecteur de l'information génétique car plus petit que l'ADN et donc passe les pores du noyau) qui a lieu dans le noyau et possède l'information nécessaire à la synthèse de la protéine. Dans le cytoplasme les ARNm interagissent avec les ARN de transfert (ARNt)



- La traduction (= la lecture) de l'ARNm en un peptide jusqu'à la formation d'une protéine dans le cytoplasme.
 - Initiation : La synthèse d'une protéine commence toujours par un même codon start : AUG correspond à la Méthionine. Cet acide aminé s'associe avec l'ARNt grâce au ribosome qui s'associe à l'ARNm tout le long de la traduction.
 - Elongation : Un nouvel acide aminé va pouvoir s'amorcer au précédent afin de créer un dipeptide relié par des liaisons peptidiques. L'ARNt sur lequel était attaché l'AA se détache.
 - Terminaison : Comme pour l'initiation, la protéine sera complète et libéré dans le cytoplasme quand on arrivera à un codon ici stop (UGA, UAA, UAG), le ribosome lui se détachera de l'ARNm.



- La maturation qui va correspondre aux différents phénomènes post-traductionnels du peptide néo-formé non fonctionnel permettant d'obtenir une protéine fonctionnelle par l'acquisition des structures secondaires, tertiaires et quaternaires, des phénomènes de glycosylation, méthylation, coupure.

Cette synthèse protéique est très gourmande en énergie, elle représente un cout moyen sur des résultats *in vivo* de 1kCal/g de protéines synthétisée. L'absence d'un seul acide aminé peut bloquer cette synthèse, on parlera d'acide aminé limitant.

La voie mTOR est le régulateur central responsable de l'initiation de la synthèse de nouvelles protéines musculaires.

L'arrêt de la synthèse de protéines passe par l'intermédiaire de mTORC1 via l'inhibition de la protéine kinase S6K1 qui induit normalement la synthèse protéique ainsi que la croissance cellulaire (10).

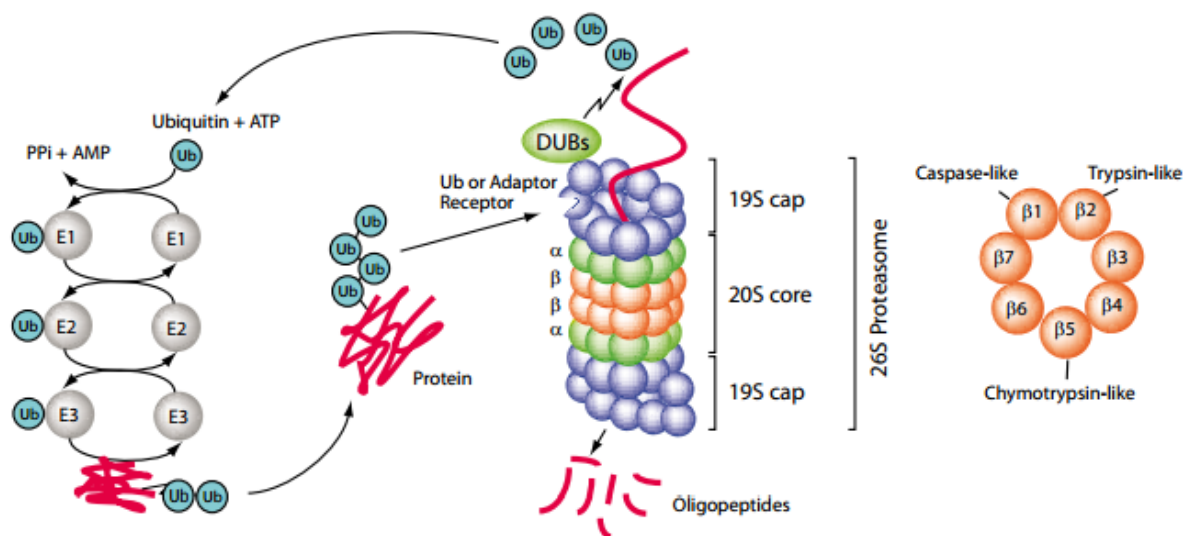
1.3.2 Dégradation des protéines

La cellule dispose de trois options pour la dégradation des protéines, impliquant chacune des enzymes spécifiques de dégradations. La dégradation par le protéasome ubiquitine dépendante, la dégradation par un lysosome ou la destruction de la protéine par les calpaïnes. Ces mécanismes de dégradation sont soumis à contrôle afin d'éviter une dégradation trop importantes et donc indésirables des protéines, mais ces signaux sont encore mal connus. Cette protéolyse permet la libération d'acides aminés dans le pool et constitue ainsi la principale source d'acides aminés pour l'organisme.

1.3.2.1 Système Ubiquitine-protéasome

La première voie de protéolyse qui est majeur se fait via le **système d'ubiquitination** qui a été découvert en 1980 par Avram Hershko, Aaron Ciechanover et Irwin Rose(11) Cette dégradation consiste en un marquage des protéines à détruire par ubiquitination qui sera reconnu par le protéasome 26S qui est une machinerie composée de nombreuses protéases, dès lors qu'une chaîne de peptides passe à l'intérieur, les liaisons peptidiques seront coupées par certaines sous-unités (par exemple, la sous-unité B1 coupe après les acides aminés aspartate et glutamate). On peut considérer le protéasome comme le contraire du ribosome.

Cette protéolyse est rapide, et est prépondérante au niveau des muscles squelettiques où il dégrade les protéines contractiles majeures (12).



De nouvelles études montrent que le protéasome 20S peut dégrader certaines protéines sans avoir à être marqué, le seul fait d'un défaut de structure peut lancer la protéolyse(13).

L'expression de MuRF1 ou MAFbx n'est pas nécessaire pour augmenter l'activité du protéasome après une charge accrue, cependant, l'expression de MAFbx peut être nécessaire pour une croissance/remodelage approprié du muscle en réponse à l'augmentation de la charge(14)

1.3.2.2 Voie des lysosomes

Ensuite nous avons la **voie des lysosomes** particulièrement présente au niveau du foie, où il y a un renouvellement rapide des protéines. C'est un système qui est sous contrôle des hormones (insuline, glucocorticoïdes) et des acides aminés. Les lysosomes sont des organites intracellulaires possédant en eux les protéases qui vont agir préférentiellement sur les demi-vies longues et sur les protéines extracellulaires. On trouve parmi ces enzymes protéolytiques, les sérines protéases, les cystéines protéases, les aspartates protéase, les métaloprotéases ainsi que les thréonine protéases, les protéines à dégrader vont entrer par endocytose dans les

vésicules lysosomales et permettre la libération d'acides aminés dans le cytosol. Ce système de dégradation consomme de l'ATP afin de conserver un pH acide à l'intérieur des vésicules.

1.3.2.3 Système Calpaïnes-Capastatine

Enfin le **système calpaïnes-capastatine**, qui est une voie dépendant de la concentration intracellulaire en calcium. Les calpaïnes forment une grande famille de protéases, mis en activité à la suite de dommage cellulaire. La Capastatine est un inhibiteur des calpaïnes permettant la régulation de l'action protéolytique des calpaïnes.

1.3.3 Utilisation des acides aminés dans les voies oxydatives

1.3.3.1 Cycle

Il n'est pas ici fait question de protéolyse, il s'agit d'une dégradation irréversible des acides aminés. La première étape correspond à la désamination, pour rappel un acide aminé possède un groupement carboxyle (COOH) et un groupement amine (NH₂). L'acide aminé réagit avec l'alpha-cétoglutarate pour produire l'acide alpha cétonique et de l'ammoniac (NH₃) sous forme libre (=toxique) et une molécule de glutamate. D'autres réactions avec d'autres acides aminés sont possibles.

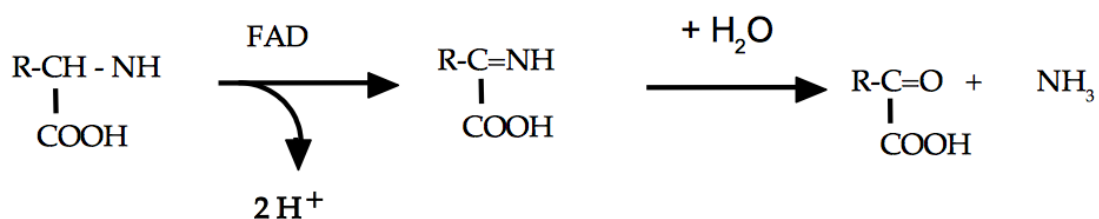
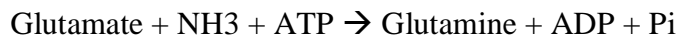


Figure 4: Réaction de désamination avec la production d'acide alpha cétonique et d'ammoniac

La molécule de glutamate sous l'action de la glutamine synthétase va être convertie en glutamine qui va permettre le transfert de l'ammoniac sous une forme non toxique vers le foie en majorité et en minorité vers les reins. La glutamine est tout simplement le transporteur d'azote sous forme neutre dans le corps humain (15).



Dans le foie, on a un retour de la glutamine sous sa forme glutamate sous l'action d'une glutaminase et donc de l'ammoniac (=désamidation), ce dernier, toxique, va être pris en charge par le cycle de l'urée et va permettre son élimination avec la production d'urée (=uréogénèse) éliminé par l'urine. Il existe une réabsorption d'une partie de l'urée au niveau intestinal permettant une épargne non négligeable de l'azote. Dans les reins, l'excès d'azote est éliminé sous forme d'ammoniac (20%).

Ce rôle de transporteur de la glutamine explique pourquoi cet acide aminé est le plus concentré dans le sang. Le cycle de l'urée est régulé par la concentrations des différents intermédiaires.

1.3.3.2 Devenir des radicaux oxydés

Le devenir diffère selon les organes et également selon l'acide aminé, même si la grande majorité exception faite des BCAA ont un métabolisme oxydatif hépatique, ils peuvent redonner un acide aminé identique ou un acide aminé non essentiel via les aminotransférases. S'il est dégradé de façon irréversible, il peut servir de précurseur à la synthèse des glucides (cas des acides aminés glycoformateurs) ou convertis en acétyl-CoA pour la synthèse des acides gras (cas des acides gras cétogénés) de façon moins importante, ils seront donc fournisseurs d'énergie.

AA glucoformateurs	Ala, Gly, Ser, Cys, Pro, Thr, Asp, Asn, Glu, Gln, Arg, Met, Val, His, Pro
AA cétoformateurs	Leu, Lys
AA céto et glucoformateurs	Phe, Ile, Trp, Tyr

1.3.4 Synthèse *de novo* des acides aminés non essentiels

On vient de voir précédemment qu'il était possible pour le squelette carboné de retrouver une fonction amine (NH₂) et donc de « synthétiser » un nouvel acide aminé.

Par définition, seuls les acides aminés non essentiels peuvent être synthétisés *de novo*, excepté pour la lysine et la thréonine qui ne peuvent pas être re-synthétisés via un squelette carboné.

Deux sont considérés par l'organisme d'importants, l'Alanine et la glutamine. Le squelette carboné est fourni pour l'Alanine par le pyruvate issu de la glycolyse musculaire. Le pyruvate par transfert d'un groupement amine du glutamate via l'alanine-amino transférase (ALAT) donne l'Alanine qui sera excrétée du muscle et utilisée par le foie pour former du glucose. Son azote est transféré sur le glutamate.

La glutamine est l'acide aminé libre le plus abondant chez l'Homme et correspond au substrat énergétique majoritaire de l'intestin grêle. Chaque organe privilégiera le glutamate ou la glutamine grâce à la glutaminase (Glutamine → Glutamate) ou à l'aide de la glutamine synthétase (Glutamate → glutamine) afin de transporter l'azote sous forme neutre.

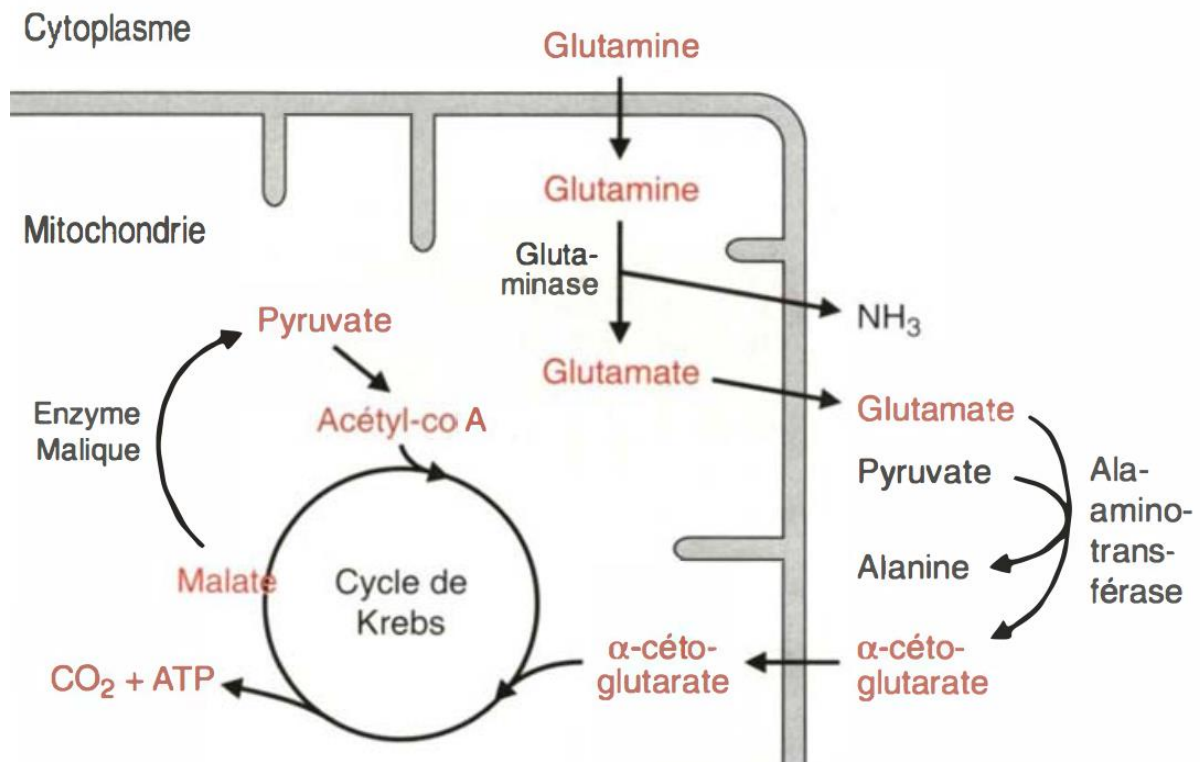


Figure 5: principales voies métaboliques de la glutamine dans l'entérocyte

1.3.5 Régulation du métabolisme protéique

Dans l'organisme, il existe une régulation simultanée entre système hormonal⁽¹⁶⁾ et nutritionnel. On retrouve des hormones qui vont favoriser un gain protéique et à contrario des hormones favorisant une perte protéique.

1.3.5.1 Hormonale

Concernant les hormones anabolisantes, on retrouve l'insuline en première position (17) qui va stimuler la synthèse protéique par augmentation de la transcription et de traduction retrouvé *in vitro*, avec un effet retrouvé surtout au niveau du muscle mais également stimuler le transport des acides aminés dans les tissus. L'insuline possède un troisième mécanisme de régulation considéré comme le plus important, elle va inhiber la protéolyse (18) (Fukagawa et al. 1985).

Trois voies de signalisation sont induites par l'insuline :

- La voie IRS/PI3K/PKB
 - Insulin receptor substrates
 - Phosphatidylinositol 3-kinase
 - Protein Kinase B (ou Akt)
- La voie des mitogen activated protein kinases (MAPK)
- La voie Janus Kinase (JAK)

Comme son nom l'indique, l'hormone de croissance va être anabolisante grâce à la stimulation de facteurs de croissance jouant sur la synthèse protéique et d'une inhibition de la protéolyse médiée par l'IGF1 par blocage de la stimulation de médiateurs clés des atrophies musculaires (ex : E3s, MuRF-1) hyper exprimés dans les états cataboliques (19). Enfin les catécholamines (Adrénaline et noradrénaline) stimulent la synthèse et inhibent la lyse protéique.

Pour les hormones catabolisantes, on trouve les hormones thyroïdiennes qui ont une action complexe. En effet, une hyperthyroïdie va plutôt provoquer une fonte musculaire alors qu'un état d'euthyroïdie est indispensable à la croissance. A l'inverse de l'insuline, on a le glucagon qui a un effet catabolique difficile à démontrer in vivo et donc contesté dans la régulation du métabolisme. Inhibant la synthèse protéique et augmentant la protéolyse, les glucocorticoïdes catabolisent surtout au niveau des muscles (très puissant).

Concernant la régulation hormonale, il faut prendre en compte les effets dans un ensemble. En effet, certaines hormones ont des effets synergiques.

1.3.5.2 Régulation nutritionnelle

1.3.5.2.1 *L'apport protéique*

L'apport alimentaire protéique va permettre l'augmentation de la concentration en acides aminés et donc stimuler la synthèse protéique. L'effet a été observé dans toutes les

principales fractions protéiques musculaires (myofibrillaire, sarcoplasmique et mitochondriale), ainsi que dans les protéines musculaires mixtes. Des élévations supplémentaires de la concentration en acides aminés ont provoqué une légère augmentation de la vitesse de synthèse des protéines. (20)

Une étude a testé l'hypothèse que la synthèse des protéines musculaire est régulée par la concentration d'acides aminés extracellulaire. Les résultats supportent l'hypothèse qu'il existe une seule relation positive curviligne entre l'augmentation de la synthèse et la concentration des acides aminés essentiels extracellulaires, mais qu'il n'y a pas de relation de ce type avec les concentrations intramusculaires, avec une synthèse optimale avec des taux intramusculaires inférieur aux niveaux de bases. Les résultats suggèrent que dans la plage entre les états post-absorbants et mixtes, quand les acides aminés (essentiels sanguins augmentent d'environ 50-80%, MPS (Muscle Protein Synthesis correspondant à la synthèse des protéines musculaires) augmente presque linéairement jusqu'à saturation de cette synthèse (observé par augmentation de la concentration sérique d'urée qui témoigne du catabolisme hépatique des acides aminés).

L'effet sur la synthèse de certains acides aminés, a été prouvé de nombreuses fois, in vitro, en particulier pour les BCAA, et encore plus pour la Leucine (21). La Leucine joue un rôle de signalisation pour améliorer la synthèse protéique en phosphorylant la protéine 4EBP1 (permettant la libération de eIF4E) et la protéine 70S6 kinase indépendamment de l'insuline, qui sont deux protéines régulatrices clés, impliquées dans l'initiation de la traduction de l'ARNm (22). Et un effet anabolisant de la glutamine important.

La disponibilité des acides aminés stimule la synthèse des protéines via la voie de signalisation mTORC1 (cible de la rapamycine). En réponse à une augmentation de la disponibilité des acides aminés cellulaires, la translocation de mTORC1 cytosolique à la surface lysosomale est nécessaire pour stimuler l'activité de la kinase mTORC1. Lors d'une administration orale de leucine chez le rat, on assiste à une augmentation de la

phosphorylation de 4EBP1 et p70S6, qui dépendent de la voie mTOR en amont comme on peut le voir sur la Figure ci-dessous.

La voie eIF2 et GCN2, en carence en BCAA en particulier en leucine vont inhiber la protéosynthèse.

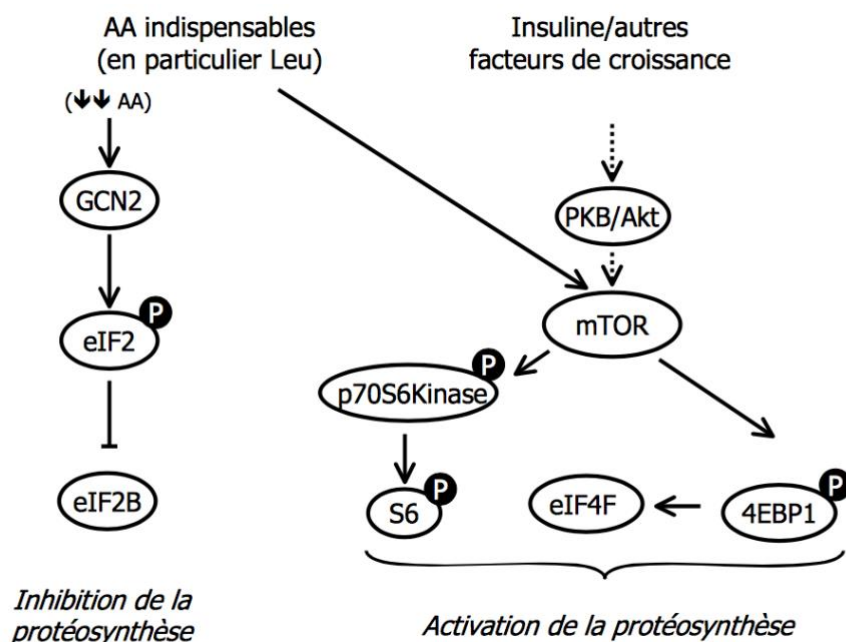


Figure 6: Voies de signalisation pour le contrôle de la protéosynthèse

GCN2 : General Control Nonderepressible 2
eIF : Eukariotic initiation factors
PKB/Akt : Protéine Kinase B
P70S6Kinase : Protein ribosomale S6 kinase
4EBP1 : Eukaryotic translation initiation factor 4E Binding protein

L'arrêt de la synthèse de protéines passe par l'intermédiaire de mTORC1 via l'inhibition de la P70S6Kinase qui induit normalement la synthèse protéique ainsi que la croissance cellulaire. (23)

1.3.5.2.2 Apport énergétique des glucides et lipides

Un apport énergétique satisfaisant permettra un maintien du bilan azoté neutre voire positif. Le turn-over des protéines (synthèse et lyse) est énergivore, si le corps n'a plus suffisamment d'énergie, le métabolisme sera altéré (diminué). Les glucides et lipides rentrent en compétition pour l'apport énergétique dont a besoin l'organisme et permet ainsi une épargne azotée.

1.3.5.2.3 Apport alimentaire

Même s'il ne représente que 15% de la ration énergétique quotidienne, les protéines sont un incontournable de l'alimentation de l'homme.

L'apport alimentaire correspond à la première source de protéines chez l'homme. Nous avons deux sources possibles chez l'homme, la principale et la plus connue qui est la source animale et également une source végétale moins connue mais non négligeable (Mahe et coll., 1997). Elles ne sont pas égales mais sont complémentaires, le but pour l'homme est de satisfaire ses besoins en acides aminés essentiels afin de ne pas altérer la synthèse protéique, ce qui est encore plus vrai chez les sportifs.

Les apports exogènes correspondent à 25% des AA pour l'organisme. Une fois ingérés, les aliments sont dégradés en nutriments, les protéines seront lysées par des enzymes digestives, hépatiques en peptides, di-peptides ou tri-peptides pour ensuite être reconstitué en protéines de structure complexe. Le foie sera le premier organe rencontré et on assistera à l'extraction splanchnique (24) qui concerne jusqu'à 80% des acides aminés.

1.3.5.2.3.1 La source animale

Les protéines d'origine animale sont une source complète d'acides aminés. En effet, elles possèdent tous les acides aminés essentiels, en bonne concentration et une très bonne assimilation par le corps. Elles proviennent essentiellement du lait, de la viande, de l'œuf et du poisson. De plus la viande correspond aux muscles striés squelettiques des animaux et est donc l'aliment le plus riche en protéine.

D'après le Ciqual, on retrouve en moyenne 23,5 g de protéines pour 100g de poulet cru(25), 21g pour le saumon cru (26). Par simplification on retiendra qu'il y a en moyenne 20% de protéines dans la plupart des viandes et poissons. Il faut cependant se méfier de cette source animale, qui apporte également des graisses saturés (qui se trouve être particulièrement vrai pour le bœuf et moins pour les viandes blanches) et est pauvre en fibres.

Dans la population française on assiste à une diminution de la consommation de protéines animales qui a été accentué en 2008 par la crise économique, avec une recherche de protéines alternatives représentées par les protéines végétales.

1.3.5.2.3.2 La source végétale

Elle est constituée par les protéines de graines de céréales, des oléagineux, des protéagineux et des tubercules. Les protéines végétales apportent également mais de façon incomplète les acides aminés essentiels. Il faudra associer plusieurs sources végétales afin d'apporter l'ensemble des acides aminés essentiels. Généralement, les céréales sont pauvres en lysine et les légumineuses et oléagineux pauvres en méthionine.

Le tofu possède en moyenne près de 10g de protéine (27) combiné à l'arachide (oléagineux) qui possède 22,8g de protéine (28), la quantité de protéine est donc non négligeable. Les oléagineux, apporte des bonnes graisses mais reste caloriques.

Par exemple, une association entre le riz et le soja permet d'équilibrer l'apport en lysine, faible dans le riz mais élevé dans le soja, et l'apport des acides aminés soufrés, faible dans le soja mais élevé dans le riz. (ANSES).

Il ne faut pas confondre qualité des protéines et qualité des acides aminés, ces derniers sont de même qualité quel que soit leur provenance. Ci-après le tableau nous montre quelques pourcentages de protéines de certaines céréales et de certaines légumineuses.

Graines	Protéines (%)
Riz°	7,4
Maïs°	8,6
Blé°	10,5
Orge°	10,6
Avoine°	13,0

Pois*	21,7
Haricot*	19,9
Soja*	35,3
Arachide*	25,4

Tableau 2: Teneur en protéines de graines de céréales et de légumineuses. °Céréales *Légumineuses (29)

Il est possible de classer en différents groupes les aliments.

Groupes d'aliments	I	II	III	IV	V	VI
Produits	Viande Poissons Œufs	Lait, Produits laitiers	Concentrés et isolés obtenus à partir du groupe IV	Graines de Légumineuses	Graines de Céréales	Légumes frais Tubercules Fruits
%protéines	13 à 22	3,5 à 26	65 à 98	16 à 30	6 à 13	0,5 à 5

Tableau 3: Groupes d'aliments protéiques(29)

1.4 Recommandations

D'après l'étude INCA3(30), l'apport énergétique sans alcool (AESA) chez les adultes pour les macronutriments glucides, lipides et protéines est estimé respectivement à 47%, 34% et 17%.

Comme pour les enfants et les adolescents, les viandes animales (viandes, poissons, œufs) sont les premières sources d'apport protéique chez les adultes, 41% au total.

- Viandes : 15%
- Volailles : 8,2%
- Charcuterie : 6,1%
- Poissons : 5,8%

On retrouve les produits laitiers et les céréales en second vecteur protéique avec 30% des apports répartis équitablement (31).

L'ANSES recommande pour la population adulte française en bonne santé un apport nutritionnel conseillé pour les protéines à 0,83g/kg/j. Actuellement en France, on constate des apports moyens de 1,3 à 1,6 g/kg/j(32).

2 LE SPORTIF DE FORCE

2.1 Généralités

2.1.1 Structure et niveau d'organisation du muscle squelettique

Nous allons faire quelques rappels sur certaines généralités du muscle, concernant les types de muscle chez l'homme il en existe trois :

- Le muscle lisse (contraction involontaire : intestin, vaisseaux, utérus)
- Le muscle strié cardiaque (contraction rythmique et involontaire : cardiomyocytes)
- Le muscle strié squelettique (contraction volontaire, locomotion)

Les muscles squelettique représente plus de 35% de la masse d'un homme contre 28% chez la femme et sont les plus répons dans le corps, ils sont sous le contrôle du SNC (33). Ce sont ces muscles striés squelettiques qui vont nous intéresser chez le sportif de force.

Un muscle est un organe attaché à l'os par le tendon, il est constitué d'un ensemble de faisceau entouré réuni sous l'épimysium. Les fibres musculaires sont regroupées entre eux par une gaine de tissu conjonctif appelé le Perimysium où on y trouve également des faisceaux sanguins et lymphatiques. L'endomysium (34) est une fine couche de tissu conjonctif qui enrobe chaque fibre musculaire ou cellule musculaire (rhabdomyocyte). A l'intérieur des fibres on retrouve les myofibrilles (élément effecteur de la contraction) , ces dernières sont composées de myosines qui sont des filaments épais et d'actine, de troponine et de tropomyosine qui sont les filaments fins. Les fibres sont appelées striées à cause de leur apparence au microscope, avec une alternance des filaments épais (sombre) et fins (clair).

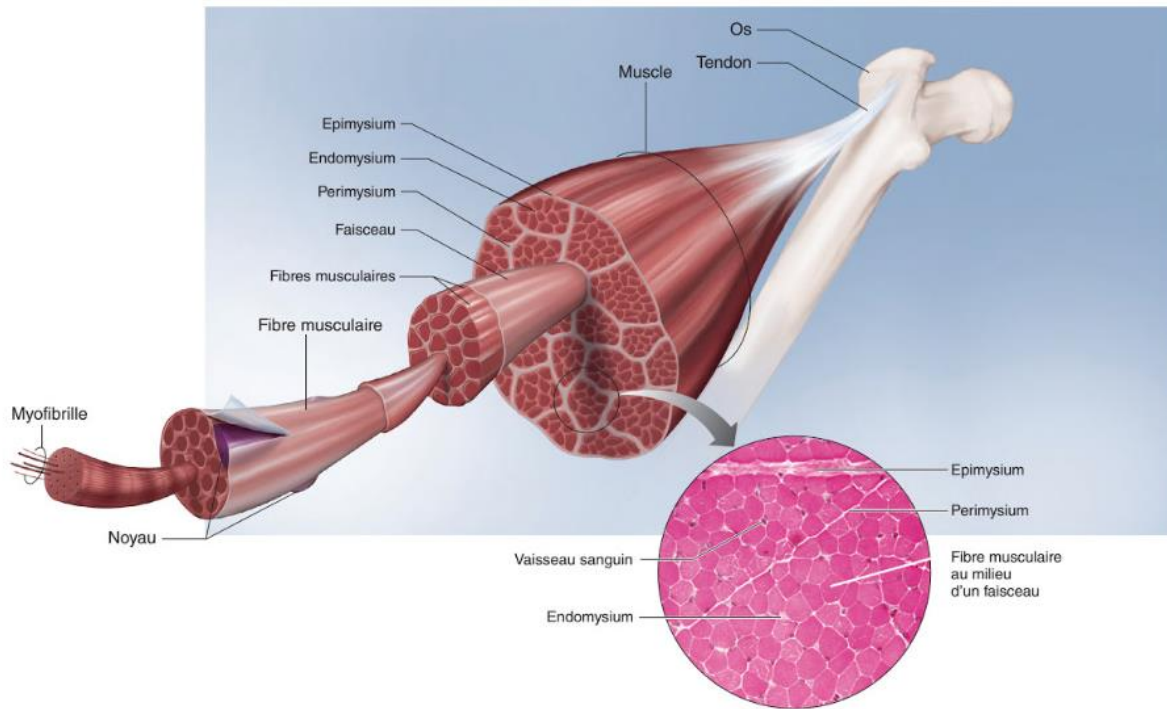


Image 2: Schéma présentant les différents niveaux du muscle strié

2.1.2 La contraction musculaire

La contraction musculaire est le résultat de la transformation d'énergie chimique en énergie mécanique. Cette transformation se fait par un glissement des filaments d'actine fins et de myosine épais selon le modèle de A.F. Huxley 1969.(voir Image 3) (35).

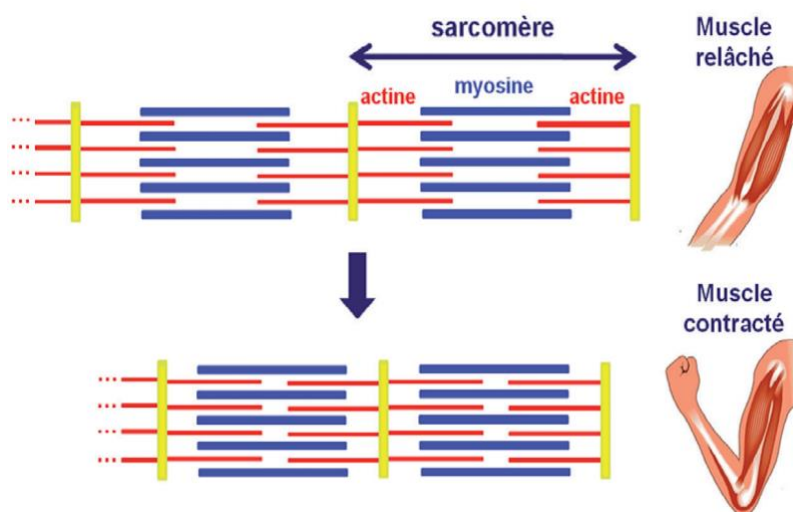


Image 3: Schématisation du glissement des filaments d'actine et de myosine. (36)

L'hydrolyse de l'Adénosine triphosphate (ATP) en Adénosine di-phosphate et Phosphate inorganique (ADP + Pi) par l'activité enzymatique de la tête de myosine fournit l'énergie chimique. La contraction musculaire est sous dépendance nerveuse et est liée à l'augmentation de la concentration intra-cytoplasmique du calcium, produisant une interaction entre les molécules d'actine et les têtes de myosines qui entraînent le basculement de cette dernière et assurant ainsi la contraction (raccourcissement du sarcomère). La présence d'une nouvelle molécule d'ATP permet la rupture de la liaison entre l'actine et la myosine (=relaxation). Ainsi, si la concentration en calcium est suffisante, le nouveau complexe myosine-ATP sera hydrolysé afin de reproduire la contraction.

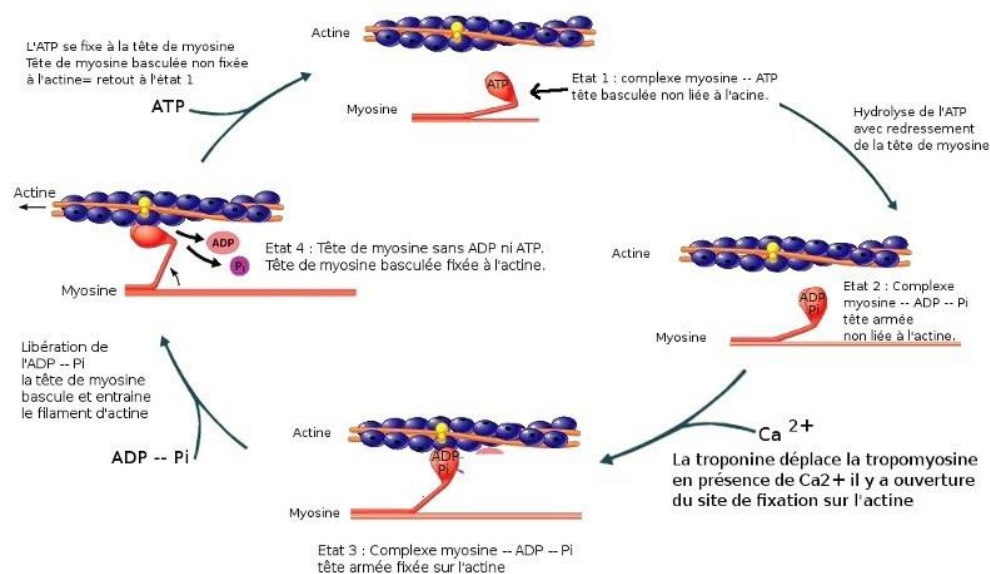


Image 4: Schématisation des étapes chimiques de la contraction musculaire (37)

2.1.3 Caractéristiques fonctionnelles

Les fibres musculaires possèdent plusieurs caractéristiques

- Excitabilité : propriété à répondre à une stimulation
- Contractilité
- Elasticité
- Extensibilité
- Plasticité

Le muscle squelettique est un tissu malléable capable de modifier le type et la quantité de protéine en réponse aux perturbations de l'homéostasie cellulaire. Le processus d'adaptation induite par l'exercice dans le muscle squelettique implique une multitude de mécanismes de signalisation initiant la réplication de séquences génétiques spécifiques de l'ADN, permettant la traduction ultérieure du message génétique et générant finalement une série d'acides aminés formant de nouvelles protéines. Les conséquences fonctionnelles de ces adaptations sont déterminées par le volume d'entraînement, l'intensité et la fréquence, et la demi-vie de la protéine. De plus, de nombreuses caractéristiques de l'adaptation à l'entraînement sont spécifiques au type de stimulus, tel que le mode d'exercice. L'entraînement prolongé en endurance suscite une variété de changements métaboliques et morphologiques, y compris la biogenèse mitochondriale, la transformation de type fibre rapide-lente et le métabolisme du substrat. En revanche, un exercice de résistance intense stimule la synthèse des protéines contractiles responsables de l'hypertrophie musculaire et augmente la production maximale de la force contractile (38).

Lors d'exercice de force on aura un catabolisme à différents niveaux, (protéines contractiles, protéines structurelles, usure...) et une récupération grâce à l'anabolisme.

Les muscles sont composés pas des faisceaux eux même composés de différents types de fibres musculaires pouvant se rétracter (provoquant la contraction du muscle) ou s'allonger (=étirement du muscle). Ces fibres musculaires sont classées selon deux caractéristiques principales :

- La vitesse maximale de contraction
- Le métabolisme préférentiel (utilisé pour re-synthétiser les molécules d'ATP)

2.1.4 Classification des fibres musculaires

Pendant longtemps la classification des fibres (38) s'est faite à partir d'une technique particulière de coloration de l'ATPase. Cette classification faisait apparaître des fibres de type I et de type IIa et IIb.

Aujourd'hui la détermination du type de fibres se fait grâce à la myosine, plus précisément à partir des chaînes de myosine lourde (MHC : Myosin Heavy Chain)

Les fibres qui étaient répertoriées IIb dans la classification basée sur la coloration d'ATPase contiennent en fait de la MHC de type IIx (Schiaffino et Reggiani 1996).

Les muscles sont composés en moyenne de 50% du type I, 25% pour les fibres IIa et IIb, ce pourcentage est variable selon les muscles du corps, en effet on retrouve jusqu'à 70% de fibre de type I dans le muscle soléaire et moins de la moyenne dans les muscles à contraction très rapide comme le triceps brachial.

Les structures musculaires diffèrent selon les personnes, en effet une personne sédentaire et un athlète de haut niveau n'auront pas la même typologie musculaire. (Costill et coll. 1976) Ces différences sont dues à la conversion possible des fibres musculaire de type II vers un type I (théorie d'Howald), dans l'autre sens la conversion est également possible mais plus difficile d'après l'expérience de C. Bosco avec un entraînement avec surcharge.

Il apparaîtrait que 25 à 50 % de cette différence de typologie des muscles, serait d'une cause héréditaire (39).

2.1.4.1 Les fibres de type I

Elles sont de faibles diamètres, avec une vitesse de contraction lente et une force de contraction assez faible (= expliqué par une faible concentration de myofibrilles). Elles sont hyper vascularisées (riche en myoglobines) mais ne permettent pas le stockage de glycogène. Ces fibres sont très riches en mitochondries et sont peu fatigables tant que le débit sanguin reste suffisant (on qualifie de résistante face au travail musculaire). Les mitochondries ont un rôle énergétique essentiel, ce sont elles qui produisent l'énergie provenant des macronutriments en énergie mécanique (de contraction par exemple) grâce à l'oxygène. Ces fibres sont utilisées pour des exercices peu puissants et prolongés comme les activités d'endurance et le maintien de la posture.

Ces fibres ont un métabolisme s'orientant vers une utilisation des voies oxydatives (= métabolisme aérobie). Elles peuvent utiliser également les glucides et les lipides comme substrat énergétique.

2.1.4.2 Les fibres de type IIb

Ce sont des fibres d'une couleur rouge possédant un grand diamètre, elles ne sont pas riches en mitochondries, peu vascularisées mais sont riches en la réserve énergétique que constitue le glycogène.

Puissantes et très rapides mais très fatigable (exercices brefs et intenses). Utilise un métabolisme anaérobie, notamment la fermentation lactique. Ce sont typiquement ces fibres que les sportifs de force veulent développer.

2.1.4.3 Les fibres de type IIa

Elles sont considérées comme des fibres intermédiaires, d'une couleur rouge pâle, elles se contractent rapidement et sont plus ou moins résistantes (moyennement fatigable, forte et endurante) (endurance active : sprint) métabolisme anaérobie et également aérobie.

Types de fibres		Type I	Type II A	Type IIB
Types d'activité		Endurance/Posture	Endurance/sprint	Force
Caractéristiques fonctionnelles	Contraction	Lente	Rapide	Rapide
	Endurance	Importante	Moyenne à Faible	Faible
	Métabolisme aérobie (oxydatif)	+++	+	/
	Métabolisme anaérobie (glycolytiques)	+	++	+++
Caractéristiques structurales	Couleurs	Rouge	Rose	Blanche
	Nombres de capillaires	+++	++	+
	Diamètre des fibres	Petit	Intermédiaire	Grand

Tableau 4: : Caractéristiques des fibres musculaires Brooke et Kaiser, 1970 (40)

Comme indiqué sur le graphique ci-dessous, les fibres de types IIb seront en première ligne pour les efforts nécessitant une grande force de contraction, viendront ensuite les fibres de type IIa puis de type I.

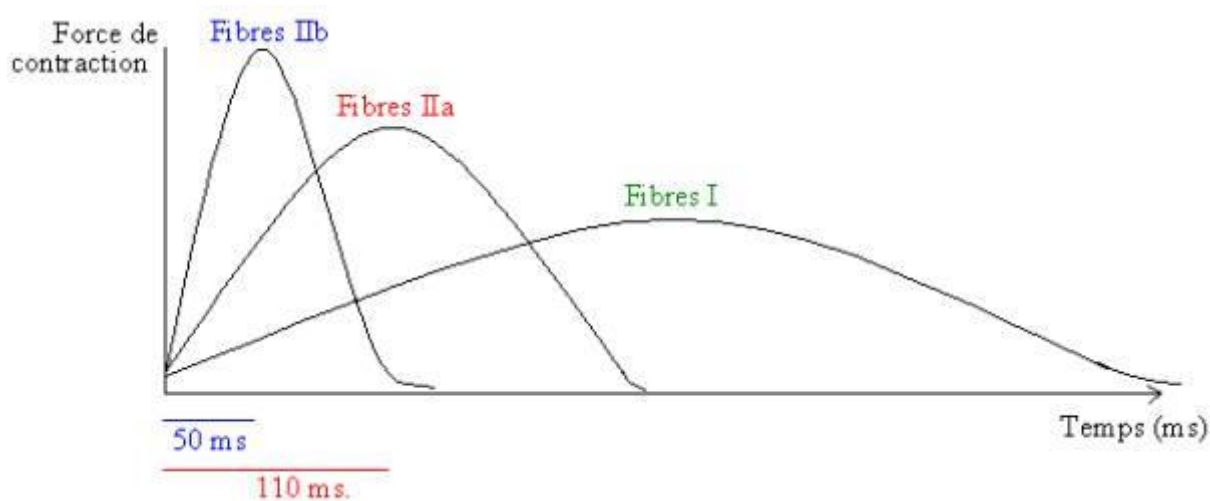


Figure 7: Utilisation des fibres musculaire en fonction de la force et la durée de contraction (41)

2.2 Les filières énergétiques

Les sports de force comme la musculation, le bodybuilding, l'haltérophilie font partie des sports où le corps n'utilisera pas d'oxygène, c'est ce que l'on appelle la filière anaérobie, ce qui implique un appel à des ressources énergétiques principalement basées sur le recyclage de l'adénosine triphosphate, la phosphocréatine et ensuite seulement, le glycogène musculaire et hépatique. A vrai dire, plus l'exercice sera court et intense, plus l'ATP sera sollicitée et recyclée par les réserves de créatine phosphate.

2.2.1 Filière Anaérobie alactique

Elle est utilisée lors des exercices brefs et intenses (sprint, haltérophilie, saut, lancer), qui se déroule sans oxygène et sans production d'acide lactique. Cette filière utilise les réserves locales de phosphocréatine qui sont épuisées en 10 secondes. Cette voie est celle utilisée dans les sprints ou les efforts explosifs par exemple (Une charge que l'on peut soulever qu'une seule fois (1RM)).

2.2.2 Filière Anaérobie lactique

Elle prend la relève de la filière alactique pour les exercices de courte durée (quelques minutes) et de grande intensité. Cette filière n'a pas besoin d'oxygène, comme son nom l'indique, pour métaboliser le glycogène musculaire dans la voie de glycolyse mais elle produit de l'acide lactique. C'est le facteur limitant de ce système car plus il s'accumule, plus les performances baissent. Cette voie permet les efforts pendant 2 à 3 minutes.

2.2.3 Filière Aérobie

Cette voie métabolique est utilisée pour les exercices prolongés ou d'endurance et est mise en jeu dès le début d'un exercice musculaire. La contraction musculaire peut être maintenue car l'ATP est régénérée en continue.

Cette filière a besoin d'oxygène et peut dégrader les glucides et les lipides. Cela dépend de la durée de l'effort et aussi de l'état nutritionnel du sportif.

Pour un exercice de résistance d'une durée < 30 min, l'utilisation des glucides est privilégiée.

Pour un exercice d'endurance supérieur à 30 minutes, ce sont les lipides qui seront utilisés, ce qui permet d'épargner les réserves de glycogène, naturellement faibles.

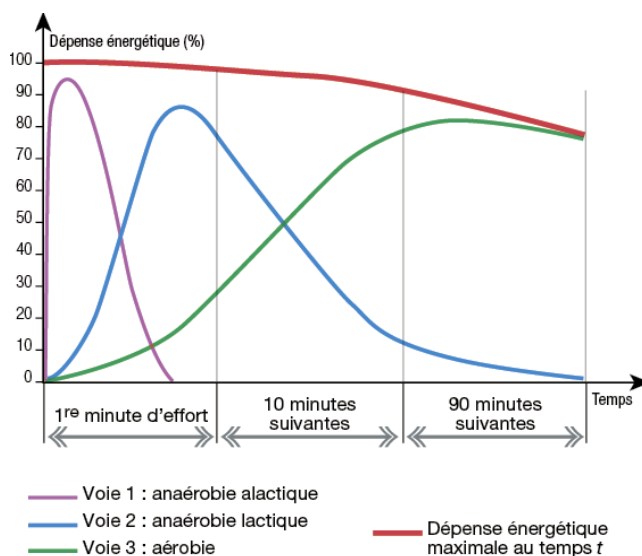


Figure 8: Les différentes filières énergétiques utilisées selon le temps et la puissance d'un exercice. Cometti et al., 1989

Le métabolisme anaérobie alactique utilise en priorité pour des efforts courts et intenses les réserves de créatine (réserve énergétique utilisable immédiatement) qui sont très faibles et interviennent uniquement les premières secondes. Le relai sera rapidement pris par les réserves de glycogène (voir Figure 9).

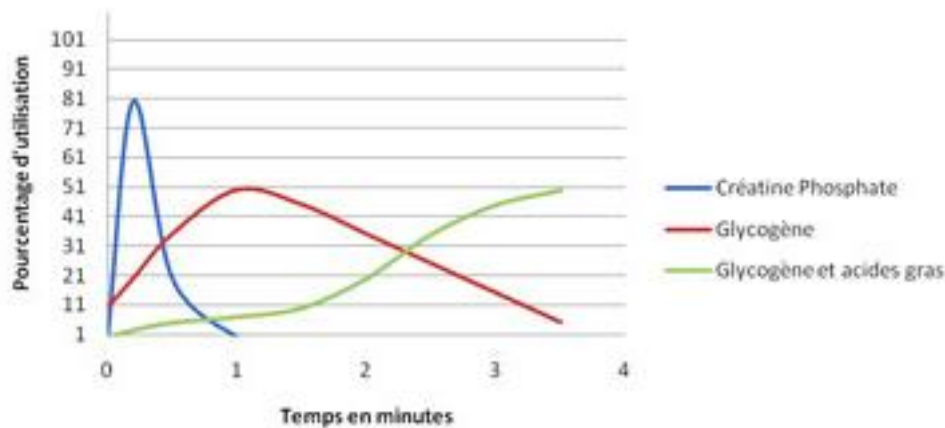


Figure 9: Variations de l'utilisation des substrats selon la durée de l'effort (42)

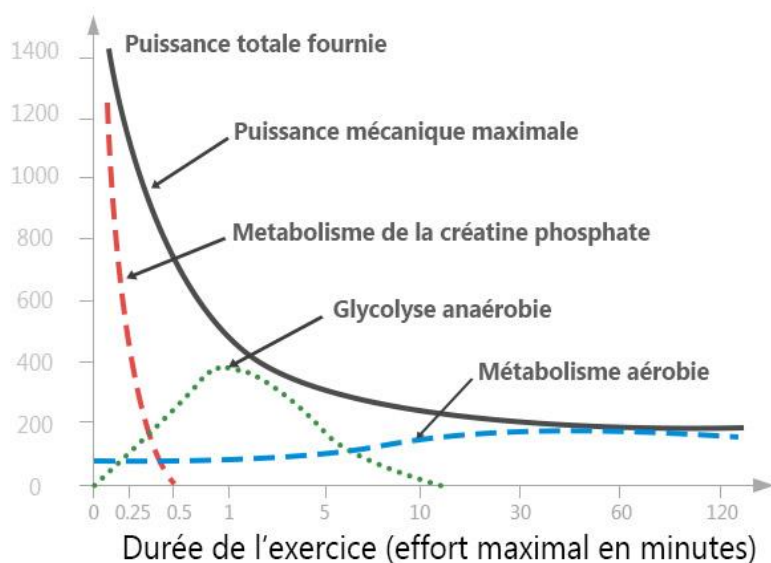


Figure 10: Utilisation des différentes sources d'énergie par le corps en fonction de la durée de l'effort. D'après Howald (1974).

2.3 Adaptation à l'entraînement anaérobie (force)

La capacité d'augmenter l'intensité de l'exercice est en grande partie permise par le recrutement d'un plus grand nombre de fibres musculaires. Ainsi, il y aura une augmentation du nombre de capillaires présent afin d'alimenter plus facilement le muscle en oxygène, une augmentation du contenu mitochondrial dans les fibres qui sont les moteurs énergétiques des cellules (Holloszy 1967) (43).

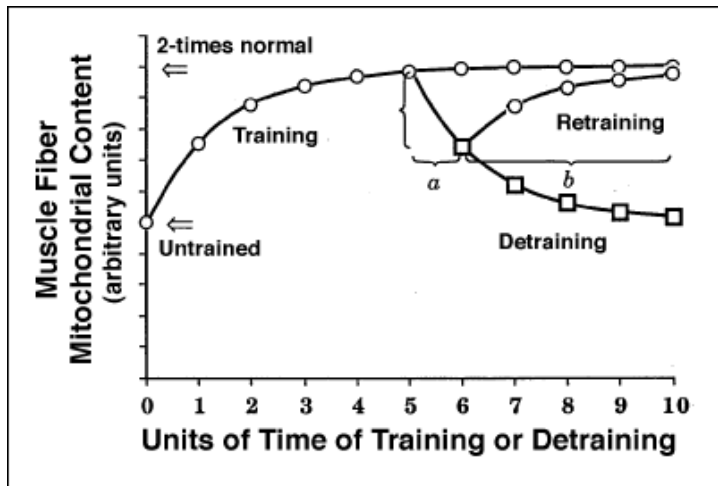


Figure 11: Variation du contenu mitochondrial dans le muscle en fonction d'entraînement (44)

Des fibres lentes aux fibres rapides :

Le sportif de force est à la recherche d'un développement des fibres rapides IIb qui lui permettront une évolution dans sa pratique sportive. Chez le rat, une étude d'inactivité physique en les suspendant (suppression des influx anti-gravitaires) pendant de longues périodes, a constaté une suppression des influx lents, avec une perte de force et d'une augmentation des fibres rapides. Chez l'homme, les sujets sont restés alités pendant plusieurs semaines, provoquant une fonte de la masse musculaire avec une augmentation du nombre de fibres rapides.

L'entraînement de musculation provoque une augmentation des fibres de type IIa alors que la logique voudrait une augmentation du nombre de fibres de type IIb. Ceci s'explique par le très peu de temps où le corps utilise ces fibres rapides par rapport à l'utilisation des fibres lentes ou intermédiaires (IIa) sur 24h, avec le maintien de la posture, de la marche. Selon Andersen et Aagaard, après un arrêt des entraînements, la concentration en fibres IIb est plus importante qu'avant la première séance d'entraînement faite.

Dans l'optique d'obtenir une augmentation de transformation des fibres de type I en fibres de type II, l'athlète doit créer des tensions importantes dans le muscle. Ce qui correspond à un travail en charge lourdes. La loi d'Henneman (1965) dit que les fibres lentes moins fatigable sont recrutées avant les fibres rapides très fatigable dont le seuil d'excitabilité

est très élevé quel que soit le type de mouvement, cette loi est soutenue par la représentation de Costill en 1980 (Image ci-dessous).

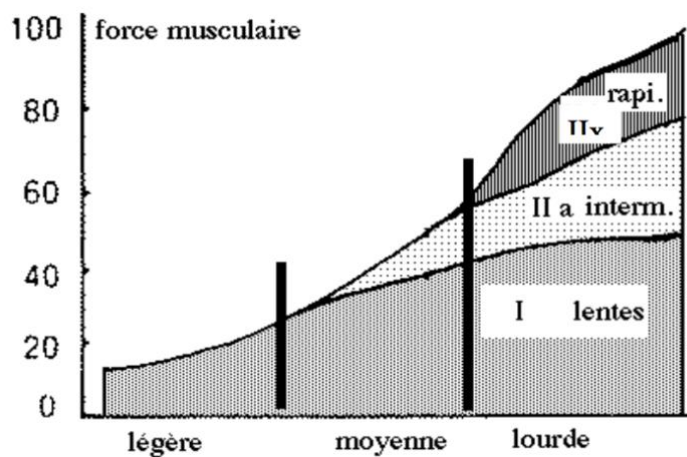


Image 5: Graphique montrant le recrutement des fibres en fonction de l'intensité de charge. (45)

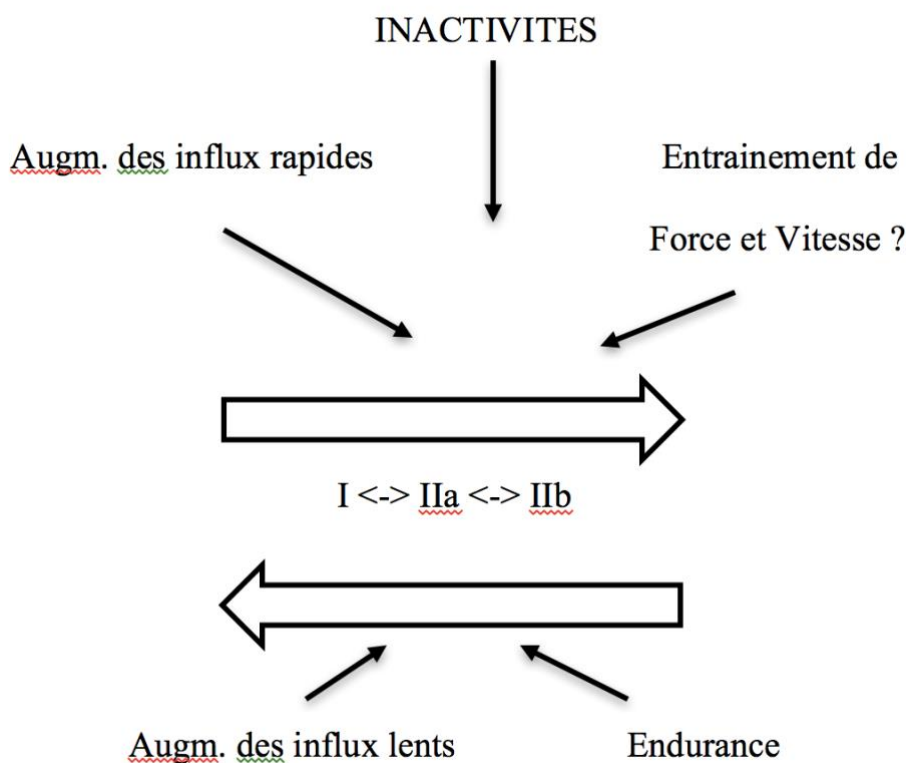


Figure 12: Différents facteurs qui déterminent la transformation des fibres. (Fluck et Hoppeler 2003)

L'entraînement de force est responsable d'adaptations neuromusculaires, tel qu'une meilleure synchronisation des unités motrices du muscle, en effet si toutes les fibres se contractent en même temps ou de façon synergique la puissance développée sera bien

meilleure que si les fibres étaient désynchronisées. De plus, l'entraînement provoque une hypertrophie des éléments cellulaires ainsi qu'un gain de force, et donc une intervention de facteurs nerveux est présente. (Recrutement de fibres, synchronisation des unités motrices intramusculaire, coordination intermusculaire force d'impulsion envoyé par chaque neurone moteur).

Chez les bodybuilders, au niveau des muscles du vaste externe (quadriceps) et des deltoïdes, on constate une concentration plus élevée en fibre de type IIa que de type IIb. (Klitgaard et al. 1990)

2.4 Des besoins protéiques spécifiques

Les protéines ont toujours été dans l'inconscient des personnes, assimilées à un substrat essentiel pour l'organisme et encore plus pour les sportifs. Les besoins en protéines varient en fonction de la pratique sportive (intensité, durée, régularité) c'est pour cela qu'il faut différencier deux types de sportif, celui d'endurance (ex : le marathonien) et celui de force (ex : Haltérophile, culturiste).

Aujourd'hui nous savons que les glucides représentent le premier substrat énergétique de l'organisme, le second par les lipides et dans une moindre part les protéines. Nous avons vu précédemment (chapitres des macronutriments : les protéines), que les acides aminés n'ayant pas de stock utilisable, peuvent subir une oxydation et devenir à leur tour substrat énergétique. Le métabolisme protéique est probablement celui qui est le plus modifié lors d'une activité physique de force.

Une ancienne recommandation donné pour un sujet sain adulte une consommation de 0,75 g/kg/j de protéine afin de satisfaire les besoins de la quasi-totalité de la population sans constituer un objectif individuel. Ce besoin théorique a été calculé par la méthode du bilan azoté (= méthode factorielle) qui mesure les pertes en azote de l'organisme (urinaire). Une

réévaluation des besoins a été faites en 2003, avec comme résultats des besoins moyens à 0,66g/Kg/j et un apport nutritionnel conseillé à 0,83 g/kg/j pour la population américaine. (46).

Les Apports Nutritionnels Conseillés (ANC) sont l'équivalent des « Reference intake » (PRI) pour l'Europe et des « Recommended Dietary Allowances » (RDA) aux Etats-Unis.

Les apports en protéines sont en France largement couverts, en effet chez l'adulte on retrouve des apports moyens entre 1,3 à 1,6 g/kg/j, largement supérieur au 0,8g de protéine recommandé. (47)

Chez le sportif, l'apport protéique aura pour objectif la couverture des besoins énergétique de base (métabolisme), mais également de couvrir les besoins nécessaires à la réparation des tissus en post entraînement. Il est donc prouvé qu'un apport de protéine (=acides aminés) à la fin d'un exercice permet de diminuer le phénomène de protéolyse (48) et il est donc supposé que cette diminution contribuera à une balance protéique positive permettant d'augmenter la masse musculaire (49). Une question reste posée sur la dégradation des protéines lésées par l'entraînement, si un apport en post exercice diminue cette dégradation, les protéines abimées et non dégradées nuiront-elles à l'adaptation positive de l'organisme à l'exercice.

C'est dans les années 1970, que le professeur et docteur Vladimir M. ZATSIORSKY(50) pose les bases de la musculation et définit la force comme suit « La force de l'homme peut se définir comme la faculté de vaincre une résistance extérieure ou d'y résister grâce à des efforts musculaires ». C'est à dire qu'il visualise la musculation avec deux objectifs : le développement de la force brute et celui de la masse musculaire.

L'apport en protéine dans ces sports est au centre de la problématique nutritionnelle. D'une manière générale, les sportifs de force dans l'optique d'une augmentation de masse musculaire ont besoin de plus de protéines qu'un sportif d'endurance (51).

On oppose régulièrement les sportifs de force et les sportifs d'endurance. L'athlète endurant aura une proportion plus importante de fibre de type I (lente) ainsi qu'une plus grande densité mitochondriale permettant une consommation d'oxygène optimale. L'athlète de force, lui, présentera une augmentation de la surface musculaire ainsi qu'une augmentation des fibres de type II (rapides).

Le développement musculaire en réponse à l'entraînement physique et la régénération musculaire après une lésion passe par le recrutement et la stimulation de cellules souches du muscle, les cellules satellites (Kadi et Thomell, 2000) tirant leur nom de leur localisation à proximité des fibres musculaires qui prolifèrent vers la région endommagée pour fusionner avec la fibre lésée ou se transformer en une nouvelle fibre (=création de nouvelles fibres + hypertrophie des anciennes). En 1999, Kadi et ses collaborateurs ont découvert la présence chez l'homme après un entraînement de force, de fibres de petit calibre, exprimant des formes immatures des protéines contractiles (52).

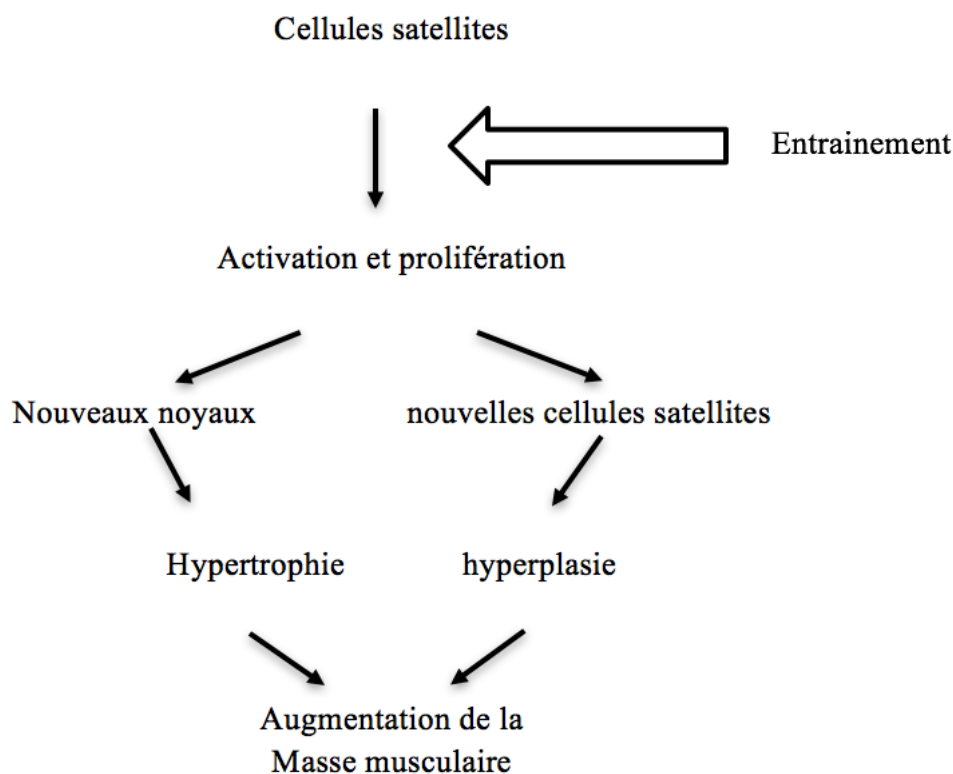


Figure 13: Processus d'utilisation de cellules satellites (53)

2.5 Métabolisme du sportif de force

Des progrès importants ont été réalisés dans la compréhension de la régulation du métabolisme des protéines, qui sont pertinents pour ceux qui s'intéressent à maximiser la performance musculaire dans le sport et le vieillissement(54). L'utilisation d'études d'infusion d'acides aminés de 24 h, le développement de méthodes pour mesurer le taux de dégradation fractionnelle du muscle squelettique et le taux de fractionnement synthétique de protéines spécifiques ont et continueront d'améliorer notre compréhension du métabolisme protéique dans l'exercice. Des études récentes ont démontré des effets potentiellement bénéfiques sur le métabolisme des protéines en modifiant la composition et le moment de l'apport de nutriment (55).

La recherche a montré que l'augmentation de l'apport en protéines alimentaires (jusqu'à 1,6 g de protéines par kg de poids pourrait améliorer la réponse hypertrophique à l'exercice de résistance (56).

En introduction nous avons vu que le métabolisme protéique chez une personne sportive sera modifié pendant un exercice (Figure 14). En effet, un sportif de force voulant augmenter sa masse musculaire aura besoin d'une balance azotée en faveur de l'anabolisme musculaire (bilan azoté positif).

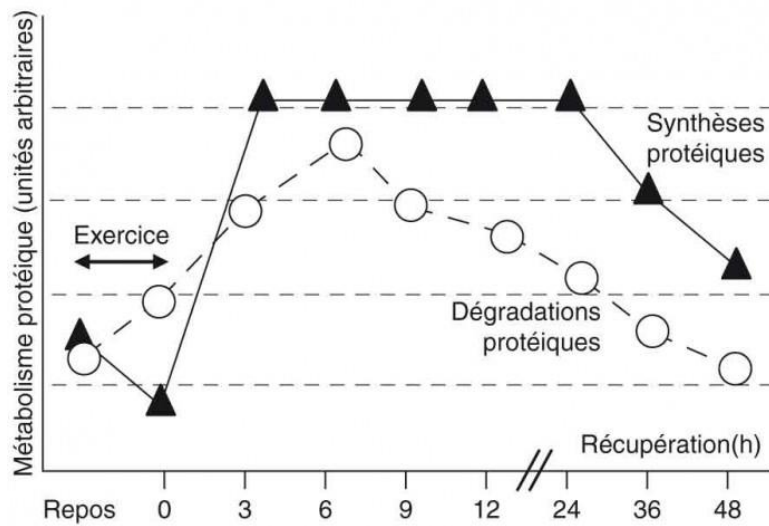


Figure 14: Evolution du métabolisme protéique chez le sportif de force (57)

Lors d'entraînement de force on constate une net diminution voir un arrêt total de la protéosynthèse et une augmentation de la protéolyse.

Pendant la récupération (C'est-à-dire en post exercice) on constate une protéolyse augmentée de 50% en moyenne et qui va perdurer jusqu'à 6 à 12h et une augmentation rapide de la synthèse de plus de 100% par rapport au métabolisme basal de 4h chez les sujets entraînés et jusqu'à 36h chez des sujets non entraînés. C'est ce que l'on appelle la fenêtre anabolique bien connue des sportifs (58). (voir Figure)

En 2003, une expérimentation contradictoire par rapport aux données ci-dessus, a été faite sur deux groupes de six hommes physiquement actifs, un groupe au repos et un groupe exercice voulant évaluer les effets d'un entraînement sur les concentrations d'acides aminés libres et la synthèse de protéines du grand vaste externe au niveau du quadriceps lors de la récupération.

Cette étude conclut qu'après un temps de récupération de 60 minutes après l'entraînement, il n'y avait pas de différence dans la synthèse ni dans la dégradation de protéines entre le groupe témoin et le groupe exposé à l'effort. A 195 minutes, le turn over

(dégradation/synthèse) était augmenté chez le groupe d'effort comparé au groupe témoin au repos (59).

Ces différences de résultats peuvent être attribuée aux limites des méthodes disponibles afin d'évaluer in vivo les modifications métaboliques (60).

Chez un sportif de force on aura une répartition des besoins en macronutriments comme suit (61) :

- Glucides : 55-60%
- Protéines : 20%
- Lipides 20-25%

2.5.1 Synthèse et Protéolyse musculaire

Une étude a étudié les taux de synthèse et de dégradation des protéines ainsi que le transport des acides aminés, chez des volontaires sains à un état de repos et après 3 heures d'exercices à l'aide de traceurs isotopiques stables d'acides aminés. Les résultats indiquent que, pendant la récupération, le renouvellement des protéines musculaires augmente en raison d'une accélération de la synthèse et de la dégradation (62).

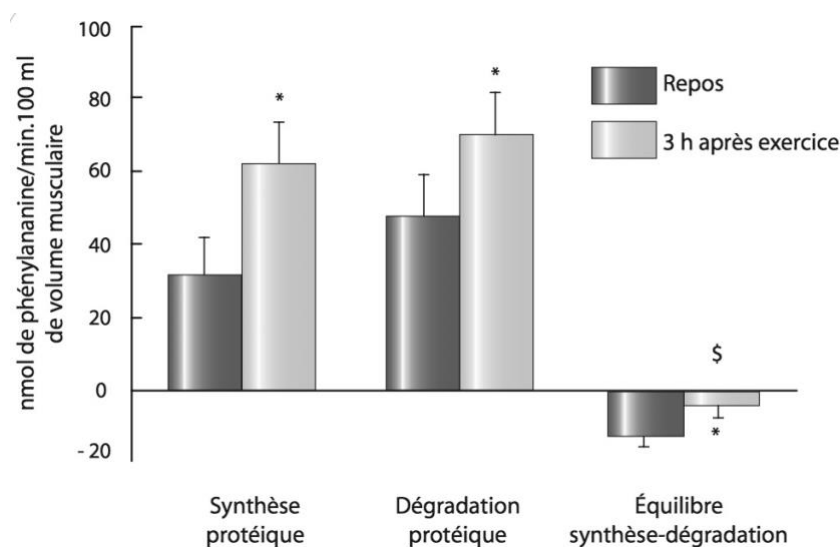


Figure 15: Evaluation des synthèses et dégradations des protéines spécifiquement musculaires. Les valeurs moyennes \pm écart type de la moyenne. Différence avec la situation de repos * $P < 0,05$; non significativement différent de zéro. D'après Biolo et al. 1995.

La dégradation des protéines est un aspect critique de la réponse du métabolisme musculaire à un exercice. Il est généralement admis que l'oxydation de la leucine est augmentée pendant l'exercice ce qui indique une augmentation de la dégradation nette des protéines (63). L'exercice augmente la synthèse protéique par la voie mTORC1 (*mammalian target of rapamycin complex 1*), ainsi il existe une demande accrue de l'organisme d'acides aminés libres afin d'être utilisé en tant que substrat pour cette synthèse. A l'arrêt d'un exercice, s'il n'y a pas d'apports exogène d'acides aminés, le corps les fournira grâce à la protéolyse.

Pendant l'entraînement, une étude récente montre une augmentation de l'activité de l'AMP kinase qui inhibe les synthèses de protéines en diminuant l'activité de la voie mTOR, qui est pour rappel un inducteur de la traduction. Ce système permet de juger grâce au statut nutritionnel (c'est-à-dire la disponibilité des acides aminés libres musculaire) et par le statut énergétique du corps par le niveau d'activité de l'activité de la kinase (Deldicque et coll., 2005). À l'opposé, pendant la phase de récupération il se produit un rebond d'activité de ce système (52).

Il a été démontré que le facteur IGF-1 est suffisant pour induire une hypertrophie du muscle squelettique. Au cours des dernières années, des voies de signalisation activées par l'IGF-1 et responsables de la régulation des voies de synthèse des protéines ont été trouvées. Plus récemment, il a été montré que l'IGF-1 pouvait également bloquer la régulation positive transcriptionnelle des médiateurs clés de l'atrophie du muscle squelettique, les ubiquitine-ligases MuRF1 et MAFbx (également appelées Atrogin-1). En outre, il a été démontré récemment que l'activation de la voie de transcription NF- κ B, activée par des facteurs cachectiques (=provoquant un affaiblissement de l'organisme) tels que TNF α , est suffisante pour induire l'atrophie du muscle squelettique, et cette atrophie survient en partie par régulation positive de MuRF1 induite par NF- κ B. D'autres travaux ont démontré un

déclencheur de l'expression de MAFbx lors du traitement par TNFalpha - la voie p38 MAPK (64).

2.5.2 Effets des entrainements de musculation sur les hormones anabolisantes

L'exercice de musculation entrainent comme nous avons vu une modulation des synthèses et dégradation des protéines, nous allons voir maintenant si les entrainements entrainent également un changement au niveau des hormones régulant le métabolisme.

La concentration d'IGF-1 (*Insulin Growth Factor-1*) intra-musculaire est augmentée sous l'effet de l'activité musculaire. L'IGF-1 stimule la prolifération et la différenciation des cellules satellites et des myoblastes qui résultent en une hypertrophie musculaire.

Les hormones thyroïdiennes semblent nécessaires à l'augmentation de la proportion des fibres rapides, en effet leur suppression empêche la synthèse des protéines contractiles rapides. Les hormones thyroïdiennes agissent sur l'expression de ces protéines par le biais du système des myogénines (Fluck et Hoppeler, 2003).

Comme pour l'hyperaminoacidémie, l'hyperinsulinémie inhibe l'augmentation de la protéolyse à la suite d'un exercice de résistance(65)(66).

Cependant, aucune augmentation de protéosynthèse n'a été rapportée en réponse à l'hyperinsulinémie après l'exercice.

Afin d'avoir une balance azotée positive, le corps doit avoir en sa possession la totalité des acides aminés essentiels et non essentiels, l'augmentation de synthèse post entrainement n'est en aucun cas suffisante pour un développement musculaire et le sportif pour avoir ce gain musculaire recherché va devoir consommer des protéines après la séance. En l'absence, la protéosynthèse sera moins efficace et la construction musculaire ne se fera pas de façon optimale.

2.5.3 Besoins quantitatifs

Il est actuellement démontré que la croissance musculaire dépend de l'apport protéique mais également de l'apport calorique total (Guezennec, 1989). En effet, chez les sportifs de force il a été démontré que les synthèses protéiques totales de l'organisme soumis à un régime hyper protéiné (2,4 g/kg/j) était quasiment identique à ceux ne consommant que 1,4 g/kg/j alors que l'oxydation de la Leucine était doublé chez des athlètes soumis à un régime hyper protéiné par rapport à des athlètes au régime faible en protéines (0,9 g/kg/j) comme le montre le diagramme ci dessous (67).

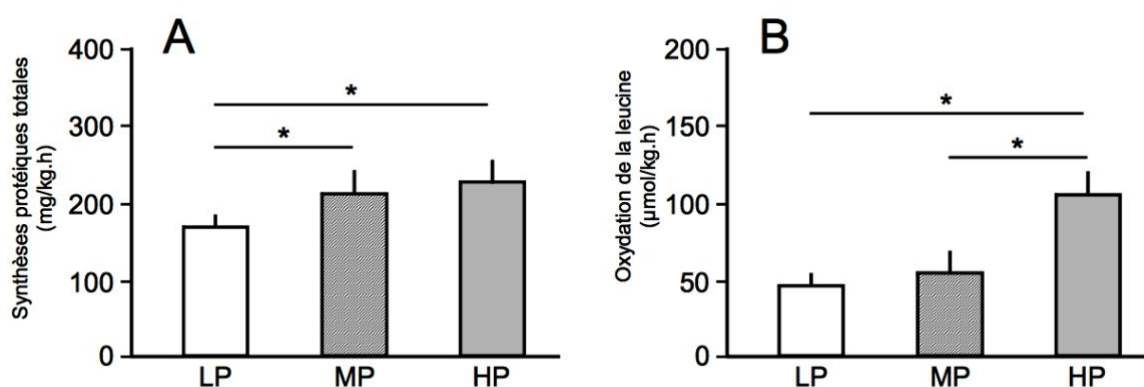


Figure 16: Evaluation des synthèses protéiques totales de l'organisme (gauche) et de l'oxydation de la leucine (à droite) chez des athlètes entrainés dans un sport de force et soumis à un régime à faible apport en protéines (LP : 0,9 g/kg/j), modéré (MP : 1,4 g/kg/j) et élevé (HP : 2,4 g/kg/j) (68)

Les besoins sont considérés atteints pour les protéines, dès lors que nous avons un maintien du bilan azoté ou un bilan positif en période de croissance, cette valeur de besoin sera donc différente selon les individus et leur état physiopathologique. Par exemple les sujets de sexe masculin auront des besoins supérieurs à ceux du sexe féminin. Sur la base du bilan azoté, le BNM (Besoin nutritionnel Moyen) est de 0,66 g/kg/j et un ANC (Apport Nutritionnel Recommandé) à 0,83 g/kg/j (4).

Plusieurs termes ont des sens proches en fonction des pays, en France les ANC, aux Etats-Unis les RDA pour les apports recommandés ou encore les Apports de sécurité (FAO/WHO/UNU).

De plus les besoins diffèrent selon les pays, la US Food and Nutrition Board recommande des apports de 0,8 g/kg de poids ce qui se rapproche fortement des ANC français (69).

Certains considèrent qu'il est bénéfique de consommer encore plus de protéines que les apports conseillés alors que de nombreuses publications scientifiques ont démontré l'absence d'avantage à cette pratique (70).

Les études sur l'équilibre de l'azote peuvent sous-estimer la quantité de protéines requise pour une fonction optimale car ces études ne sont pas directement liées à la performance de l'exercice. En outre, il est possible que l'apport protéique au-dessus des niveaux jugés nécessaires par les études de bilan azoté améliore les performances physiques en augmentant l'utilisation de l'énergie mais peut stimuler l'augmentation de la masse grasse par un apport calorique supérieur chez les individus, ce qui n'est pas recherché (71).

En outre, il existe un risque réel de consommer des quantités insuffisantes de protéines, en particulier dans le contexte de l'exercice physique ; un bilan azoté négatif sera probablement créé, conduisant à un catabolisme accru et à une altération de la récupération après l'effort (72).

2.5.3.1 Maintien musculaire

Chez certains sportifs, la recherche n'est pas d'augmenter la masse musculaire mais de la maintenir en évitant le catabolisme musculaire et donc de stabiliser la balance azotée. On pourra donc recommander des apports entre 1,3 et 1,5 g/kg/j de protéines végétales mélangées à celles animales (avec près de 40% de protéine à haute valeur nutritionnelle) pour équilibrer le bilan d'azote. Des apports protéiques entre 1,1 et 1,2 g/kg/j peuvent être suffisants, en prenant en compte uniquement des protéines à hautes valeurs biologiques.

Il semble qu'un apport protéique moyen de 1,25 g/kg/j soit suffisant pour compenser la dégradation accrue des protéines musculaires au cours de séances d'exercice de type résistance (73).

2.5.3.2 Gain de masse musculaire

On pense que l'exercice force/puissance augmente les besoins en protéines plus encore que l'exercice d'endurance, en particulier pendant les étapes initiales de l'entraînement et ou les fortes augmentations de volume. Les recommandations pour l'exercice de force/puissance varient généralement de 1,6 à 2,0 g/kg/jour, bien que certaines recherches suggèrent que les besoins en protéines peuvent diminuer pendant l'entraînement en raison d'adaptations biologiques permettant une rétention protéique (74)(4)(75).

Il faut noter également que le besoin protéique est plus important chez un sportif entrant dans un cycle de déficit calorique, comme par exemple une sèche avant une compétition de bodyfitness (Guezennec, 1989) qui correspond à une période de déficit calorique pour l'athlète afin de perdre un maximum de masse grasse et ainsi avoir le corps le plus dessiné possible.

Pour le gain musculaire on parle également d'hypertrophie musculaire, qui peut être transitoire ou chronique. L'hypertrophie transitoire correspond à une augmentation du volume de muscle suite à un exercice aigu, qui résulte d'une rétention liquidienne au niveau des espaces interstitiel et intracellulaire du muscle. L'hypertrophie chronique témoigne d'une modification structurale du muscle, avec une augmentation du nombre des fibres musculaires ainsi qu'une augmentation du volume des cellules le composant. Chez l'homme, différentes études suggèrent que l'hypertrophie est due à une augmentation du nombre de fibres plutôt qu'à une augmentation du volume. (Larsson et al. 1986)

Le but de certains athlètes est d'augmenter leur masse musculaire, on peut proposer alors des apports entre 1,8 et 2,5 g/kg/j. La majorité des apports doivent rester alimentaires et ne doivent pas dépasser une durée de plus de 6 mois par an (4). Sur de nombreux sites ou de magazines dédiés aux sportifs (bodybuilding, fitness...), de nombreuses publicités et articles mais également des coach diplômés sans source scientifique poussent les athlètes à consommer et dépasser ces recommandations (76).

L'une des croyances populaires les plus connues à propos des protéines est celle concernant le risque pour les reins. En effet, la majeure partie des études mentionnant un risque, ont été faites sur des animaux ou sur des patients atteints d'une pathologie rénale. Pour cela, il est impossible d'étendre ces résultats sur des individus en bonne santé ne souffrant d'aucunes pathologies rénales. Une étude sur la fonction rénale a été faite sur deux groupes, un végétarien et un autre non-végétarien, n'a rapporté aucune différence sur la détérioration de la physiologie rénale autre que celle du vieillissement (77).

Il est par contre, inutile de consommer plus que les recommandations comme certains sportifs ou entraîneurs le pensent comme de nombreuses études ont pu le montrer (78). L'AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments) qui est devenu l'ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), considère des apports protéiques entre 2,2 à 3,5 g/kg/j comme élevée et très élevée si supérieure à 3,5 g/kg. Ces valeurs ont été déterminées à partir de la capacité maximale d'adaptation à la synthèse d'urée chez un adulte en bonne santé.

2.5.4 Besoins qualitatifs

Les besoins quantitatifs ne suffisent pas pour un athlète, il faut qu'il consomme des protéines de qualité. La qualité est définie par sa valeur biologique, sa vitesse de digestion,

son indice chimique etc.... En effet, la protéosynthèse nécessite la disponibilité des 20 acides aminés afin d'être la plus efficace possible. Cette apport alimentaire, doit comporter l'ensemble des AA essentiels (40% du total) ainsi qu'être riche en leucine qui est un AA très présent dans les phénomènes de synthèses protéiques.

La qualité nutritionnelle des protéines alimentaires comporte deux éléments important, l'aptitude à fournir les quantités d'azote et d'AAI nécessaire pour le métabolisme de base et leur place dans le développement de pathologies (79) (allergie, troubles cardiaques, cancer).

Il existe différentes méthodes d'évaluation de la valeur nutritionnelle des protéines (expérimentation animale) :

Coefficient d'efficacité Protéique (CEP) = Poids/protéines ingérées

Coefficient d'utilisation digestive (CUD)= azote absorbé/azote ingéré

Utilisation Protéique Nette (UPN)= azote retenu/azote absorbé = PD-CAAS

2.5.4.1 Evaluation de la qualité des protéines

2.5.4.1.1 L'Indice Chimique

La valeur nutritionnelle d'un aliment dépend de la quantité de protéines qu'il apporte. Comme nous l'avons vu précédemment, les protéines sont composées d'acides aminés non essentiels et essentiels, ces derniers non apportés en quantité suffisante deviennent un facteur limitant pour la synthèse protéique. C'est pour cela que la qualité d'une protéine sera étudié par sa composition et richesse en acides aminés essentiels (devant représenter 40% de la totalité des acides aminés) et encore plus avec la leucine, l'isoleucine et la valine qui sont des acides aminés essentiels à chaines ramifiés (BCAA) particulièrement présent et utilisés dans les muscles.

On appelle donc l'Indice Chimique (IC) le rapport le plus faible entre la quantité de chaque acide aminé essentiel contenu dans la protéine considérée et la quantité de chaque

acide aminé correspondant de la protéine de référence qui était pendant longtemps le blanc d'œuf et qui a été remplacé par l'OMS par une protéine de référence théorique considéré comme optimale avec un indice chimique égal à 100.

$$IC = \frac{\text{concentration de l'AA limitant de la protéine étudiée}}{\text{concentration de l'AA limitant de la protéine étudiée}} \times 100$$

Une protéine qui n'atteindrait pas le seuil d'un indice chimique optimal (=100) est une protéine qui ne sera pas absorbée dans sa totalité par l'organisme.

	FAO/WHO/UNU		AFFSA	
	mg/kg/j	mg/g protéine ¹	mg/kg/j	mg/g protéine ¹
HISTIDINE	10	15	11	17
ISOLEUCINE	20	30	18	27
LEUCINE	39	59	39	59
LYSINE	30	45	30	45
METHIONINE + CYSTEINE	15	22	15	23
METHIONINE	10	16	-	-
CYSTEINE	4	6	-	-
PHENYLALANINE + TYROSINE	25	38	27	41
THREONINE	15	23	16	25
TRYPTOPHANE	4	6	4	6
VALINE	26	39	18	27
TOTAL	184	277	178	270

Tableau 2 : Besoins en acides aminés indispensables de l'adulte et profils de référence en acides aminés indispensables proposés par la FAO/WHO et l'AFSSA 2007. ¹Besoins en acides aminés de l'adulte (0,66 g/kg/j de protéines) WHO/FAO/UNU. 2007.

Concrètement, pour calculer cet IC, il faut disposer de l'aminogramme de la protéine afin d'y trouver l'acide aminé limitant. Pour ce faire, il faut faire le rapport entre l'acide aminé étudié avec l'acide aminé théorique correspondant, le plus petit rapport trouvé sera multiplié par 100 et le résultat sera l'indice chimique.

Cette technique est très simple et rapide d'utilisation avec nos connaissances actuelles sur les acides aminés limitants. Le point limitant de cette technique est la définition que l'on

donne à la protéine de référence. Malgré cela, les nombreuses marques de compléments alimentaires pour sportif comme Eafit continue de l'utiliser pour mettre en valeur leur produit, comme sur la figure ci-dessous avec un indice chimique de 108.



Image 6: Figure : Utilisation de l'Indice Chimique par Eafit

Les marques enrichissent leurs protéines en acides aminés essentiels afin d'avoir un IC supérieur à 100 pour un aspect commercial le plus souvent.

Voici quelques pourcentages d'Indice chimique :

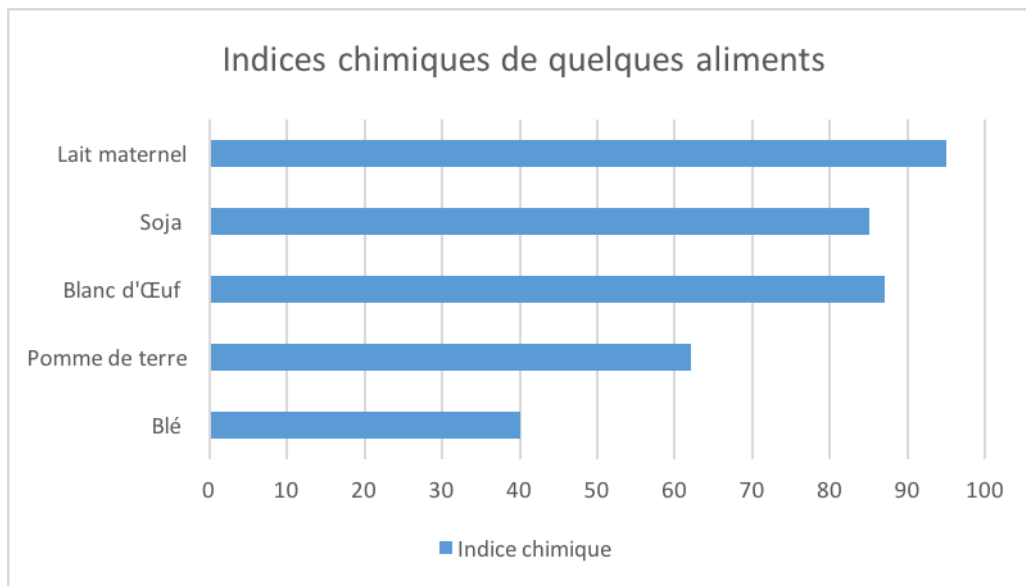


Image 7: Source FAO

2.5.4.1.2 ii. Le PD-CAAS

En 1989, la consultation conjointe FAO/OMS sur l'évaluation de la qualité des protéines recommanda le PD-CAAS pour Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score comme méthode de référence, en français Score Chimique Corrigé de la Digestibilité (SCCD) (63).

Cette méthode permet d'obtenir la Valeur Biologique d'une protéine. La FDA a reconnu cette méthode comme officielle pour la détermination de la qualité des protéines de nombreux aliments (81).

Cette dernière est calculée en multipliant deux facteurs, l'Indice Chimique des acides aminés et le coefficient de digestibilité vraie :

$$PD-CAAS = \text{indice chimique} \times \text{coefficient de digestibilité}$$

La digestibilité encore appelé coefficient d'utilité digestive (CUD) a été déterminé pour chaque source de protéine par des chercheurs. Il s'agit donc du pourcentage du nutriment

utilisé par l'organisme (qui sera métabolisé et non excrété). Ce coefficient d'un même nutriment peut varier s'il est associé à un autre nutriment.

Contrairement à l'IC, il a été décidé préférable pour le PD-CAAS de ne pas pouvoir être supérieur à 100%, en effet on ne sait pas si une concentration trop importante en acides aminés essentiels est bénéfique ou au contraire néfaste pour la protéine (nécessité de convertir un AAI en AANI). Dans l'alimentation générale la composition complète en acide aminé essentiel et la forte digestibilité des protéines animales explique pourquoi elles ont une valeur biologique plus importante en comparaison avec les protéines végétales rarement complètes en acides aminés essentiels, particulièrement en acides aminés soufrés.

Dans le rapport de la consultation d'experts FAO, sont mises en évidence les limites de cette technique. En effet, la digestibilité est calculée sur l'ensemble du tube digestif alors que la digestibilité au niveau de l'intestin grêle serait plus adéquate. De plus, tous les acides aminés ne sont pas digérés à la même vitesse.

Aliments	PD-CAAS (%)
Blanc d'Œuf	100
Caséine	100
Lentilles	52
Riz	47
Blé complet	42

Figure 17: Valeurs de PD-CAAS en % de certains aliments

2.5.4.1.3 Le DIAAS

La FAO dans son rapport publié en 2013, est proposé un nouvel indice : le DIAAS pour Digestible Indispensable Amino Acid Score (82). Il sera utile du fait du contexte mondial d'accroissement de la population afin de répondre au mieux aux besoins nutritionnels de la population mondiale. Le DIAAS est donc proposé pour remplacer le PD-CAAS (83). Cet indice n'est plus calculé sur la base du score du seul acide aminé limitant mais à partir de la composition de chacun des acides aminés indispensables et de leur biodisponibilité dans

l'aliment considéré en prenant en compte leur digestibilité individuelle au niveau de l'intestin grêle (digestibilité mesurée par prélèvement au niveau de l'iléon).

$$DIAAS = \frac{\text{mg of digestible dietary indispensable amino acid in 1g of the dietary protein}}{\text{mg of the same dietary indispensable amino acid in 1g of the reference protein}}$$

L'une des limites de l'évaluation de la qualité des protéines basée sur la digestibilité et la teneur en acides aminés, que ce soit PDCAAS ou DIAAS, est qu'elles n'évaluent pas l'utilisation des acides aminés après leur absorption

Les valeurs des scores d'acides aminés digestibles indispensables (DIAAS) pour certaines protéines laitières et végétales peuvent mieux décrire la qualité de la protéine que les valeurs calculées en utilisant le concept des scores d'acides aminés corrigés par la digestibilité des protéines (PDCAAS), en effet cette étude montre que le PDCAAS peut surestimer la qualité des protéines.

La FAO a donc publié différentes données sur différentes protéines qui nous intéressent pour les compléments alimentaires destinés aux sportifs. Ces informations valident de nouveau que les protéines végétales (Soja et Riz) sont un apport moins complet que les protéines issues du lait. Mais on voit également que selon la source de protéine végétale, l'acide aminé limitant est différent, ce qui explique le besoin de mélanger les sources de protéines afin d'avoir tous les acides aminés essentiels réunis.

TYPE DE PROTEINE	VALEUR BIOLOGIQUE	DIAAS	AA LIMITANT
WHEY	104	115	Histidine
CASEIN	80	111	Histidine
SOJA	74	92	Méthionine + Cystéine
RIZ	64	64	Lysine

Tableau 6: Tableau comparatif des qualités des différents types de protéines (Rapport FAO, 2013)

En 2016, l'ANSES a mis à jour sa table de composition de référence de plus de 2600 aliments, il est donc assez facile de se procurer la composition moyenne d'un aliment en protéine. Il faut faire attention avec les autres tables de composition étrangères (allemande, canadienne...), en effet chaque pays diffère selon les modalités de présentation des informations nutritionnelles. En France il s'agit donc de la table Ciqual (84).

3 SUPPLEMENTATION PROTEIQUE

La consommation de compléments alimentaire est de plus en plus importante en France mais aussi dans le monde entier. Les Etats-Unis ont toujours été précurseur sur ce domaine, d'ailleurs certains de leurs compléments sont interdits en France car considéré dangereux pour la santé. Le dispositif de Nutrivigilance de l'ANSES a en effet recueilli près de 50 signalements d'effets indésirables qui pourrait être lié à la consommation de compléments destinés au sportif (85).

3.1 Législation

Les protéines en poudre répondent à la définition non pas de compléments alimentaires (Décret n°2006-352 du 20 mars 2006) mais de denrées alimentaires destinées à une alimentation particulière. (Directive 2009/39/CE du parlement européen et du conseil du 6 mai 2009). Ces denrées répondent à trois points spécifiques :

- Existence d'une catégorie de population dont les besoins nutritionnels sont distincts de ceux de la population générale
- Composition adaptée à ces besoins nutritionnels
- Etiquetage indiquant clairement que ces produits répondent à un objectif nutritionnel particulier.

Il existe 6 groupes de denrées alimentaires :

- Préparation pour nourrissons et préparations de suite
- Denrées alimentaires à base de céréales et aliments pour bébés destinés aux nourrissons et aux enfants en bas âge
- Aliments destinés à être utilisés dans les régimes hypocaloriques destinés à la perte de poids

- Aliments diététiques destinés à des fins médicales spéciales
- Aliments adaptés à une dépense musculaire intense, surtout pour les sportifs
- Aliments destinés à des personnes affectées d'un métabolisme glucidique perturbé (diabétiques)

Ce sont des aliments adaptés à une dépense musculaire intense, sous forme de barre, de boissons, de gel... On y retrouve donc les pots de protéines, on parle plus souvent de compléments alimentaires, même s'il s'agit d'un abus de langage (86).

Des documents décrivent les exigences relatives au développement et à la fabrication des compléments alimentaires et autres denrées alimentaires destinés aux sportifs exempts de substances interdites par la Convention Internationale de l'UNESCO contre le dopage dans le sport introduit en droit français par l'effet conjugué de la loi n° 2007-129 du 31 janvier 2007 qui en autorise la ratification et ratifié par le décret n° 2007- 503 du 2 avril 2007. Ces exigences s'appuient sur les dispositions réglementaires applicables aux denrées alimentaires en général et à celles destinées aux sportifs en particulier.

En France, il est particulièrement facile de fabriquer et de vendre des compléments alimentaires, une simple inscription au registre du commerce est nécessaire. La qualité des produits est très variable, en effet de nombreux intermédiaires interviennent entre la fabrication de la matière première et la mise sur le marché. Ce qui renvoie à une traçabilité presque impossible à déterminé précisément.

Selon une étude récente 15% des compléments alimentaires contiendraient des substances dopantes alors que rien n'est mentionné sur la fiche (87).

Il existe des bonnes pratiques de fabrication pour les compléments alimentaires et les denrées alimentaires qui permettra aux consommateurs de savoir que l'industriel s'est engagé à suivre une norme et les protéger de toute substance dopante. Il n'y a aucune norme obligatoire, elles sont toutes basées sur le volontariat, témoignant du sérieux de l'entreprise envers ses consommateurs.

3.2 Les normes existantes

Une Norme est un document servant de référence pour les industriels qui fournit les caractéristiques/descriptifs et les règles pour les activités et/ou leurs résultats (88).

3.2.1 Qualité de fabrication (en usine)

3.2.1.1 HACCP

Pour Hazard Analysis Critical Control Point (89) qui peut être traduit en français par l'Analyse des dangers et des points critiques pour leur maîtrise. Ce n'est pas une norme, mais elle est utilisée comme référence/démarche/méthode pour la création de norme comme l'ISO 22000 depuis 2005.

L'HACCP est donc un système identifiant, évaluant et maîtrisant les dangers qui menacent la salubrité et la sécurité des aliments (NF V01-002: 2008). La méthode a été déclaré comme référence par la commission du Codex Alimentarius, en Europe et donc en France également. On la retrouve utiliser dans différentes directives ou arrêté comme la Directive 93/43 relative à l'hygiène des denrées alimentaires.

Cette méthode est basée sur 7 principes et 12 étapes afin de réduire au maximum possible les différents risques (biologiques, chimiques et physiques).

PRINCIPE 1	Procéder à une analyse des dangers
PRINCIPE 2	Déterminer les points critiques pour la maîtrise (CCP)
PRINCIPE 3	Fixer le(s) seuil(s) critique(s)
PRINCIPE 4	Mettre en place un système de surveillance permettant de maîtriser les CCP
PRINCIPE 5	Déterminer les mesures correctives à prendre lorsque la surveillance révèle qu'un CCP donné n'est pas maîtrisé
PRINCIPE 6	Appliquer des procédures de vérification afin de confirmer que le système HACCP fonctionne de manière efficace
PRINCIPE 7	Constituer un dossier dans lequel figurerons toutes les procédures et tous les relevés concernant ces principes et leur mise en application

Tableau 7: Les 7 principes de l'HACCP (90)

Ces principes sont appliqués en suivant 12 étapes, via un formulaire, qui seront validées par un organisme de vérification (91).

3.2.1.2 ISO 22 000

L'ISO 22000 (92) (International Organisation for Standardisation) est une norme internationale relative à la sécurité des denrées alimentaires applicable à toute la filière agro-alimentaire qui a été publiée en 2005 à la suite d'un consensus entre 45 pays. Elle est basée sur la méthode HACCP et la norme ISO 9001 (système de management visant à une amélioration continue/ Roue de Deming).

L'ISO ne fournit pas de services de certification, si une usine souhaite obtenir la certification à cette norme ISO, elle doit s'adresser à un organisme de certification indépendant.

Cette norme répond à deux demandes :

- Le besoin d'améliorer la sécurité chez tous les acteurs de la filière alimentaire
- Le besoin d'harmoniser les méthodes existantes en matière de sécurité alimentaire par le biais d'un référentiel international reconnu.

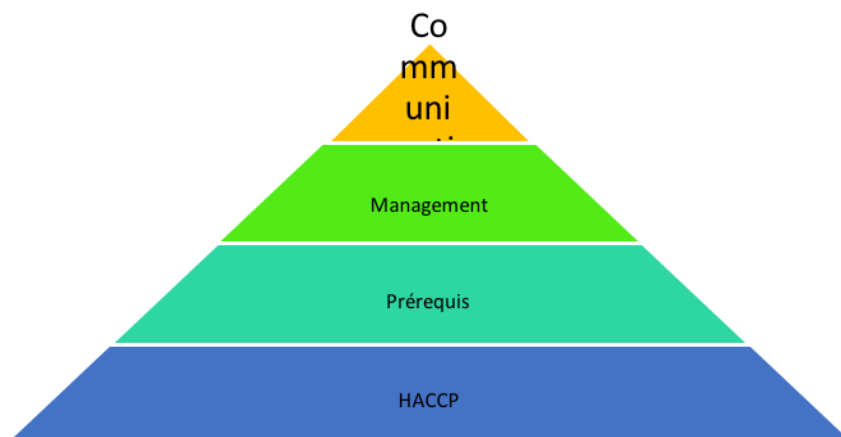


Figure 18: Pyramide de construction de la norme ISO 22000

On peut diviser cette norme en quatre parties :

1- La communication interactive

La communication à tous les niveaux, en amont et en aval, de la chaîne alimentaire* (*séquence des étapes et opérations impliquées dans la production, la transformation, la distribution, l'entreposage et la manutention d'une denrée alimentaire et de ses ingrédients, de la production primaire à la consommation)

Communication interne et externe sont nécessaires afin de maîtriser et d'identifier les dangers liés à la sécurité des aliments.

2- Le management du système

L'ISO 9001 est une norme garantissant une amélioration continue du système de production. Les principes de management appliqués à la sécurité des denrées alimentaires de l'ISO 9001 sont maintenant bien connus, ils sont au nombre de 7 et ont été établis sur l'expérience et les connaissances de collectifs internationaux participant au Comité Technique ISO/TC 176.

PRINCIPE 1	Orientation client
PRINCIPE 2	Le leadership
PRINCIPE 3	Approche processus
PRINCIPE 4	Implication du personnel
PRINCIPE 5	Amélioration continue
PRINCIPE 6	Prise de décision fondée sur des preuves
PRINCIPE 7	Management des relations avec les parties intéressées

Tableau 8: Les sept principes de Management de la qualité ISO 9000:2015

3- Prérequis

Les Bonnes Pratiques de Fabrication, les Bonnes Pratiques d'Hygiène et Bonnes Pratiques Agricoles sont les piliers d'un système HACCP.

4- HACCP

Permet de réaliser l'analyse des dangers pour en réduire l'existence.

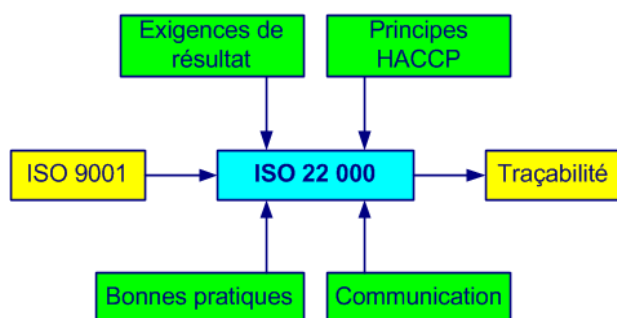


Figure 19: Mises-en forme de l'ISO 22 000

3.2.1.3 Les BPF

Les Bonnes Pratiques de Fabrication (93) (BPF) ou Good Manufacturing Practices (GMP) en France sont une norme nationale reconnue au niveau international qui évolueront en permanence du fait de l'évolution des pratiques, des processus industriels et de l'amélioration continue. GMP ou BPF sont donc des normes qui vont certifier l'application du plan HACCP de l'industriel et donc garantir que les produits sont fabriqués et contrôlés de façon cohérente selon les normes de qualité adaptés et nécessaire à la mise sur le marché. Cette certification GMP (cGMP) est valable pendant 3 ans avant de devoir repasser par des audits.

L'approche des 5M (94) est un bon moyen pour l'industriel d'évoluer en identifiant la ou les causes de l'effet néfaste observé. Il y a donc 5 catégories :

- 2- Le MILIEU : poussière, manque d'éclairage, température, humidité
- 3- La MAIN D'ŒUVRE : Manque de compétence, manque de communication
- 4- Les MATIERES : pièces, fournitures, qualité de la MP
- 5- Le MATERIEL : mauvais calibrage,
- 6- METHODES : procédures, mode opératoire, mauvaise consigne

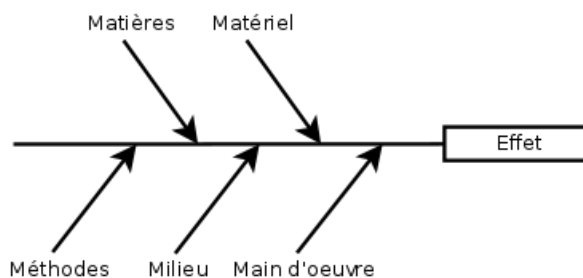


Figure 20: Diagramme d'ISHIKAWA ou Méthode des 5M (Crédit : flickr.com)

3.2.1.4 FSSC 22 000

The Food Safety System Certification 22 000(95) (Certification du système de sécurité alimentaire) fournit un cadre pour gérer efficacement les responsabilités de l'industrie en matière de sécurité alimentaire. Ce protocole créé par la Foundation for Food Safety Certification (également propriétaire de l'HACC) a pour but d'étendre et de compléter les normes ISO existantes.

On peut donc retrouver sur certains packaging le logo de la norme ISO ou uniquement l'indication du respect d'une ou de plusieurs normes. Comme par exemple avec l'étiquette de l'ISO WHEY ZERO de chez BioTechUSA™ (Image 1) où il est notifié « *BioTech USA Kft. Operate ISO 9001/2008 quality management system and ISO 22000 :2005 food safety management system certified by NQA. The facility is HACCP, GMP, HALAL certified* »



Image 8: Packaging de la whey isolate de BioTechUSA avec les normes de qualité.

3.2.2 Qualité du produit

3.2.2.1 Conformité de l'étiquette avec la réalité nutritionnelle

La déclaration nutritionnelle devient obligatoire, à partir du 13 décembre 2016, sur les denrées préemballées afin de permettre aux consommateurs de pouvoir comparer les produits entre eux et avoir ainsi la possibilité de faire des choix plus favorables pour leur santé(96).

L'étiquetage doit donc correspondre à un modèle prédéfini ci-après.

	Pour 100 g ou 100 ml
énergie	kJ/kcal
matières grasses	g
dont :acides gras saturés	g
glucides	g
dont :sucres	g
protéines	g
sel	g

Tableau 9: Contenu, présentation et expression de la déclaration nutritionnelle obligatoire depuis 2016.

En plus de cet étiquetage, le gouvernement a également retenu en 2017, un nouveau code couleur permettant de classer les denrées alimentaires selon leur qualité, ainsi les couleurs iront du vert au orange foncé où se trouveront la plupart des sodas et plats préparés (97).

Des tests vont permettre de vérifier l'exactitude du descriptif des valeurs nutritives affichées sur l'étiquette. C'est-à-dire la concentration en protéine ainsi que l'aminogramme, l'absence de contaminants, d'allergènes si annoncée. On va retrouver des tests de microscopie, enzymatiques, de chromatographie etc.... Ce sont des vérifications qui ont un coût et qui ne sont pas obligatoires

3.2.2.2 Test de stabilité

En plus de la conformité de l'étiquetage, il est nécessaire que le produit soit stable afin de répondre aux qualités mentionnées et de garantir un produit de qualité à plus ou moins long terme.

Pour cela, différents tests en laboratoires (physiques, chimiques et microbiologiques) dans différentes conditions (durée, humidité) seront effectués.

3.2.2.3 Test Anti-dopage



Image 9: Représentation imagée de la norme NF V 94-001

La Norme NF V 94-001 « Prévention du dopage dans le sport » a été publiée en 2012 pour permettre aux sportifs de connaître les compléments ou les denrées alimentaires pouvant être consommés sans risque d'un contrôle anti dopage positif. Elle est le résultat d'un travail collaboratif sur demande du ministère des Sports à AFNOR Normalisation (98). (Ex : eafit)

3.3 La consommation de compléments alimentaires

Chez les sportifs, la connaissance des protéines et de leurs fonctionnements est essentiel car ce macronutriment participe au développement musculaire et à la formation d'énergie. Un nombre considérable d'adeptes de la musculation consomment de façon régulière des suppléments de protéines (99).

En effet la question du pourquoi de cette consommation se pose au vu des effets indésirables qui pourrait être imputable à la consommation de compléments visant à augmenter la masse musculaire ou visant à diminuer la masse grasse.

Nous l'avons vu précédemment, un sportif de force doit pouvoir consommer jusqu'à 2,5g/kg/j de protéine, ce qui pour un athlète de 70 kg correspondrait à pouvoir manger 6 steaks de 100g (1 blanc de poulet cru=22,4g) et plus de 8 œufs entier cuit à l'eau. (2 œuf = 100g = 12,6g de protéine), ce qui explique le recourt à la supplémentation protéique via des compléments alimentaires. (voir tableau) De plus, les suppléments protéiques, sont pauvres en lipides et en glucides ce qui aura pour conséquence une prise de masse maigre en évitant les

abus et les effets indésirables de certaines viandes. En effet, récemment la viande rouge a été classés comme « probablement » cancérogène par le CIRC. (graisses animales etc...)

		ANC en g/kg/j	Quantité à consommer par jour	Equivalents en blanc de poulets (bdp) ou œuf dur (od)
SPORTIF DE FORCE (70kg)	Maintien musculaire (1)	1,3 - 1,5	91 - 105	4 à 5 (bdp) ou 15 à 17 (od)
	Croissance musculaire (2)	1,8 - 2,5	126- 175	6 à 8 (bdp) ou 20 à 28 (od)

Tableau 10: Equivalent nutritionnel nécessaire pour un maintien(1) ou une croissance musculaire (2) en fonction d'un aliment (ici le blanc de poulet et l'œuf dur) (source : Ciqua)

Comme pour l'alimentation, il existe deux sources pour les protéines dites « en poudre », la source animale (œuf, lait, bœuf...) et une source végétale (soja, pois, riz...).

3.4 Les protéines animales

3.4.1 Protéines issues du lait

3.4.1.1 Lactosérum

3.4.1.1.1 Généralités

Depuis les années 70 (100), une prise de conscience a été faites concernant les rejets de lactosérum des industriels qui s'élevés à près de 45% de la production (équivalent à plus de 1,2 million de tonnes) dans les eaux ouvertes. Ce lactosérum était à l'origine utilisée uniquement pour l'alimentation directe des animaux (porcherie).

On assiste à un changement de statut du lactosérum qui est passé de sous-produit peu valorisé à ingrédient laitier à part entière toujours utilisé en alimentation animale mais aussi en alimentation humaine (poudre infantile, plats préparés...). On assiste donc depuis les années 2000 à une augmentation des exportations mondiales de lactosérum (30%), avec une classification SH040410 utilisé par la douane pour caractériser les échanges de lactosérum,

entre les poudres, les concentrés ou encore les isolés de lactosérum. Les Etats-Unis et l'Europe sont les deux plus grands exportateurs (101).

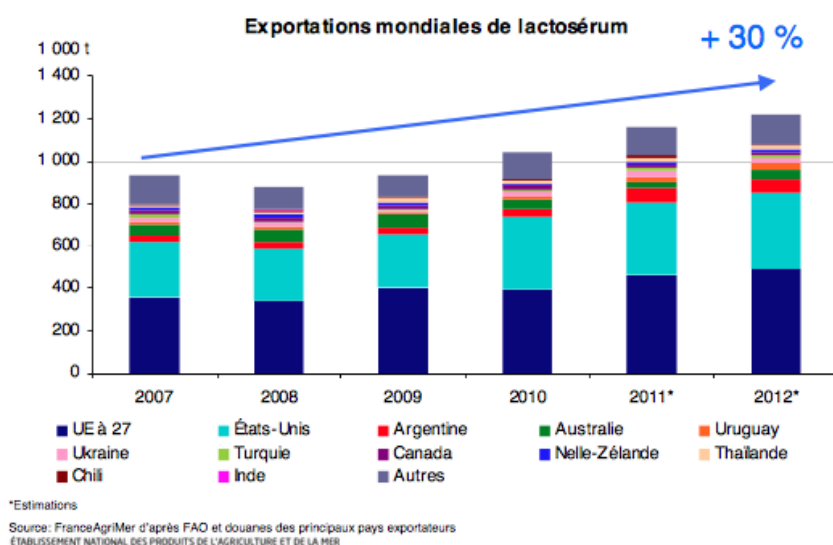


Figure 21: Diagramme d'évolution des exportations mondiales de lactosérum

Issue du procédé de fabrication du fromage, « le lactosérum » encore appelé « petit-lait » correspond à la partie liquide jaune-verdâtre qui se sépare du lait caillé (qui est la partie solide) produit lors de la coagulation du lait. Il est composé majoritairement (à plus de 90%) d'eau, de sels minéraux, de sucre, de protéines et de très peu de matière grasse (102).

On distingue les lactosérums selon l'acidité du liquide obtenu qui est mesuré en Degré Dornic (°Dornic), qui correspond à la mesure de l'acidité du lait (1°Dornic correspond à 0,1 g d'acide lactique par litre de lait)

- Les lactosérums doux dont l'acidité a un pH proche de 6,5 issu de la production de fromage à pates pressées cuite ou non (emmental, edam ...) (15-22°Dornic)
- Les lactosérums acides atteignent une acidité proche de 4,5, issus de la production des fromages à pâtes fraîches et molles ou lors de la production de caséines. (>120°Dornic)

Les lactosérums acides contiennent moins de lactose et de protéines et plus de minéraux (phosphore, calcium, chlorure de sodium...) car il a été produit par fermentation lactique. Il faut savoir que selon la composition des lactosérums varient en fonction de la spécialité fromagère dont elle est issue et donc de l'origine du lait, généralement les lactosérums sont issus du lait de vache.

	Lactosérum Doux (g.L⁻¹)	Lactosérum acide (g.L⁻¹)
Eau	93,5%	94%
Extrait sec	6,5%	6%
Lactose (g.L⁻¹)	76	74
Protéine (g.L⁻¹)	13,5	12
Cendres (g.L⁻¹)	8	12
Acide lactique (g.L⁻¹)	<1,8	>1,8
Calcium (g.L⁻¹)	0,6	1,8-2
Phosphore (g.L⁻¹)	0,6	1,5
Chlorure de Sodium (g.L⁻¹)	2,5	7,5

Tableau 11: Composition moyenne d'un lactosérum doux et d'un lactosérum acide (103)

A côté de cette origine fromagère, il existe des whey non dénaturées issues de protéines laitières, qui seront de meilleure qualité grâce à des procédés de filtration mécanique et l'absence de différents traitements thermiques et chimiques au lait comme la pasteurisation. Ce sont les protéines dites natives.

La whey est l'une des protéines minoritaires du lait (6,4 g/L de lait), la principale étant la caséine à près de 80%. Un litre de lait de vache contient environ 32 à 35 grammes de protéines mais seulement 20% de cette quantité correspond à de la whey. Il faut donc au moins 150 litres de lait pour obtenir un seul petit kilo de whey. Parmi ces 20% de protéines, on distinguera principalement l'alpha lactalbumine et la beta-lactoglobuline, minoritairement on retrouvera les immunoglobulines, le sérum albumine et la lactoferrine (104).

La beta-lactoglobuline est la protéine principale à 55% du lactosérum, sa structure lui permet de fixer la vitamine A et certains AG. L'alpha-lactalbumine est une métalloprotéine

contient tout comme la beta-lactoglobuline tous les AAI, permettant une stimulation des défenses immunitaires.

	Concentration (g/L)
β-lactoglobuline	2,5-3
α -lactalbumine	1,2
Sérum albumine	0,3-0,4
Lactoferrine	0,10

Tableau 12: Concentration des différentes protéines du lactosérum

Le lactosérum est une protéine dite à assimilation rapide qui permet de faciliter la récupération et la régénération musculaire. La diffusion importante et rapide d'acides aminés aux muscles (idéalement dans l'heure qui suit la pratique sportive = fenêtre anabolique) active l'anabolisme qui permet de stimuler la reconstruction musculaire et aide le corps à construire plus de fibres.

La Whey se présente sous plusieurs formes en fonction de la qualité et de la vitesse d'assimilation. Vous trouverez ainsi dans un ordre croissant :

- Le Concentrat : 30-80%
- L'Isolat 90-95 %
- L'Hydrolysât (max 30% des protéines hydrolysés)

Ces différents types sont obtenus par différentes méthodes d'extraction que nous allons voir maintenant.

3.4.1.1.2 Méthodes d'extraction

Il existe différentes méthodes de séparation des lactosérums, dont les principales sont des procédés membranaires tel que la microfiltration et l'ultrafiltration, ainsi que des procédés chromatographiques qui sont indiqués dans le diagramme ci-dessous(105).

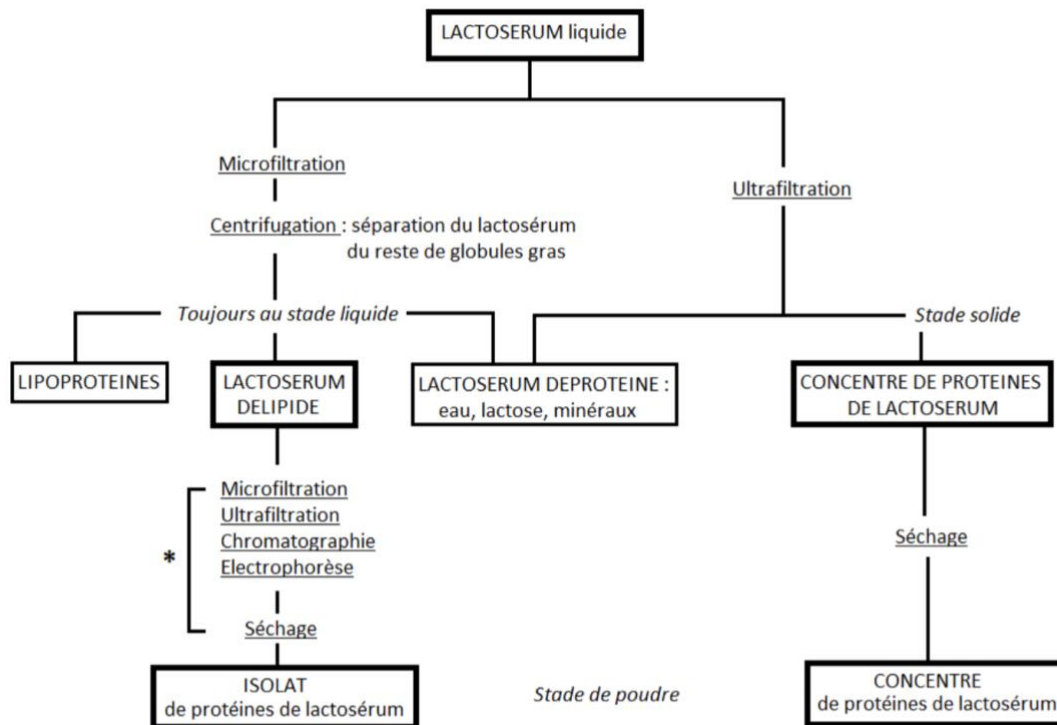


Figure 22: Diagramme des différentes techniques utilisables pour obtenir les poudres de lactosérum. (*Ces techniques sont utilisées ou non selon l'industriel) adaptée de SNAPPE J.J., LEPOUDERE A., SREDZINSKI N., Protéines laitières.2010

3.4.1.1.2.1 Thermo-coagulation

Le lait récolté va être réceptionné et analysé avant de le faire chauffer afin d'éliminer une partie ou la totalité des microorganismes et de pouvoir être consommé sans risque pour la santé.

Le lait peut être pasteurisé, c'est-à-dire chauffé à une température comprise entre 72 et 85°C pendant une quinzaine de secondes et nécessite une conservation au réfrigérateur à 4°C et une consommation dans les sept jours. Alternativement, il peut être stérilisé par le procédé UHT (Ultra Haute Température), chauffé à une température entre 140 et 150°C) pendant quelques secondes (2 à 5), ce qui permet une conservation de trois mois dans l'emballage original non ouvert (dû à la destruction totale des microorganismes).

Cette technique permet de récupérer un peu plus de 85% de protéines, cependant elles sont altérées par le chauffage.

La coagulation permet l'obtention du caillé et du lactosérum qui nous intéresse. Il existe deux techniques utilisés, la voie enzymatique qui fait coaguler le lait par un ajout de présure (constitué de deux enzymes : la chymosine et la pepsine) qui va agir sur les micelles de caséine(106). La voie d'acidification utilise les bactéries lactiques (*Lactobacillus* ou *Streptococcus*) qui vont provoquer la fermentation du lactose en acide lactique, qui acidifie le milieu pour provoquer l'agrégation des micelles de caséines et former un gel lactique (107).

3.4.1.1.2.2 Protéines natives

A côté du procédé de thermo coagulation spécifique des matières premières provenant du fromage (=valorisation de sous-produits), les protéines dites natives ou bio-actives n'ont pas subi de pré-traitement, car on utilise directement le lait cru afin de produire une protéine de haute qualité. Ce qui permet la conservation des constituants et donc des propriétés biologiques. Elles sont encore minoritaires sur le marché des compléments alimentaires mais commencent à attirer un grand nombre de sportifs.

La législation oblige les industriels a pasteuriser leur matière première, mais ils utilisent une pasteurisation à basse température ce qui permet d'éviter une dénaturation trop importante.

3.4.1.1.2.3 Les procédés membranaires (Microfiltration et Ultrafiltration)

Les procédés membranaires sont des techniques de plus en plus utilisées car elles sont économiques, respectueuses de l'environnement et permettent d'éviter l'altération des protéines.

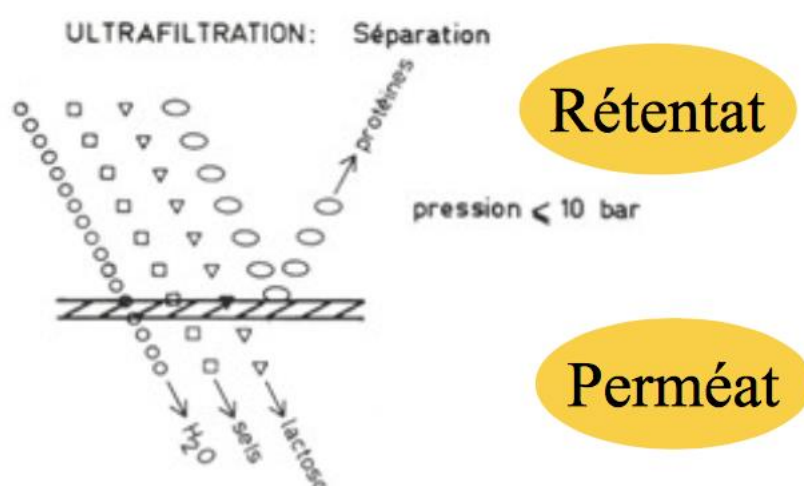
Pour les microfiltrations (0,1 à 10microns) et Ultrafiltrations (0,001 à 0,1 microns) il s'agit de procédés mécaniques de filtration qui permettent de séparer à l'aide d'une membrane poreuse céramique appropriée les différents constituants du lait. Ces techniques permettent d'éliminer les bactéries, de clarifier et délipider le lactosérum et sont également utiles pour l'écémage et la standardisation des laits de consommation (108).

Le problème le plus connu de ces techniques de filtration tangentielle auquel on applique un débit constant, est le colmatage de la membrane qui résulte de trois phénomènes. On constate une formation de gâteau de filtration en surface du filtre, d'un blocage des pores en surface et en profondeur ainsi qu'une adsorption de solutés au niveau du matériau membranaire (109).

On peut utiliser des techniques mécaniques comme la technique de microfiltration comme « prétraitement » avant l'utilisation de l'ultra-filtration pour diminuer le colmatage et donc augmenter les performances de la seconde filtration.

La rétention des protéines totales du lactosérum est très élevée dès le début de la microfiltration, la beta-lactoglobuline est plus retenue que l'alpha-lactoglobuline.

Ces techniques mécaniques, si elles sont utilisées sur un lait non dénaturé, permettent une extraction de 80% de protéines non altérées. Elles sont appelées protéines natives. Par contre, la filtration à partir d'une source fromagère permettra l'extraction des protéines altérées par les procédés du milieu fromager.



Comme le schéma le montre ci-dessus, l'Ultrafiltration permet la séparation entre deux phases, le rétentat qui est riche en protéines et le perméat riche en lactose, en eau et minéraux.

Le retentât sera évaporé ou séché par atomisation afin d'avoir un produit concentré en protéines de lactosérum. Le perméat, pourra subir une osmose inverse qui permettra l'élimination de l'eau du petit lait concentrant ainsi son volume initial, et permettant des économies sur le transport ainsi que pour les procédés d'évaporation.

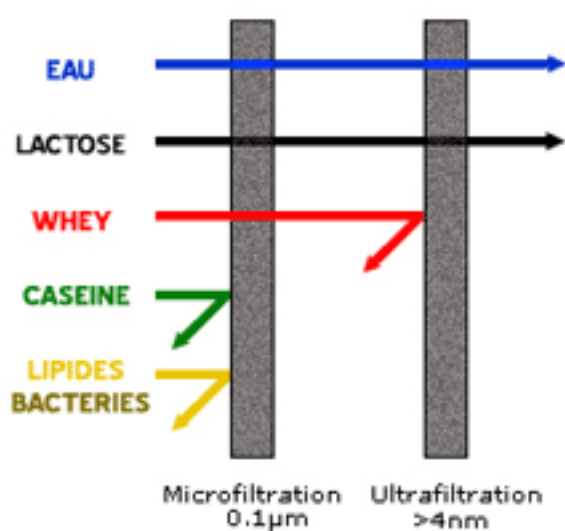


Figure 23: Schématisation du procédé de filtration sur membrane (110)

3.4.1.1.2.4 Procédés chromatographiques

Les procédés chromatographiques sont contrairement aux procédés membranaires, une technique très coûteuse, avec un effet négatif sur l'environnement (pollution). Mais cette technique permet l'obtention de fractions protéiques de grandes purités.

La filtration sur gel permet la séparation des protéines selon leur taille (Cf : Schéma ci-dessous). Toutes les protéines ne sont pas homogènes en terme de taille, dans ce système, la colonne de chromatographie est remplie de billes poreuses, qui permettra la séparation des protéines selon la taille. Les protéines les plus petites se retrouveront coincées en haut de la

colonne dans les billes creuses alors que les plus grosses et plus lourdes molécules iront plus loin dans la colonne car non absorbées.

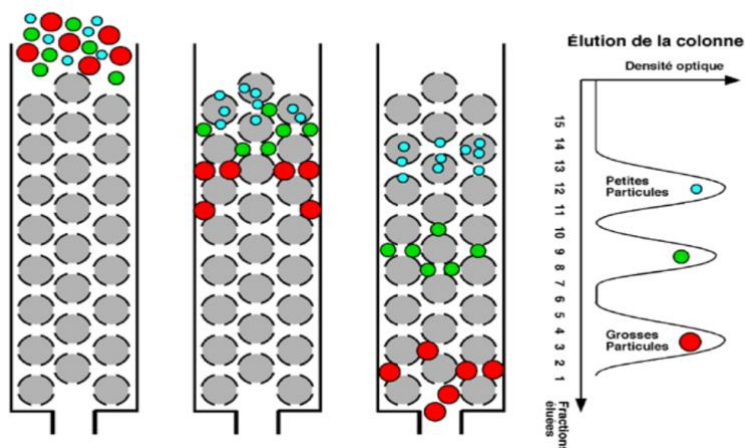


Figure 24: Schéma d'un système de chromatographie gel filtration (111)

La chromatographie est une méthode de séparation des constituants d'un mélange, ici le lait. Les protéines sont des molécules amphotères qui selon le pH s'ionisent de manière différente, un pH alcalin entrainera la formations d'anions alors qu'un pH acide entraine la formation de cations. La phase stationnaire est une résine échangeuse d'ions (colonne) qui possède un potentiel d'échanges de cations ou d'anions qui permettra l'interaction avec les protéines.

Une fois que les protéines sont fixées sur la colonne, on procède à un lavage avec un solvant adapté en fonction de la protéine souhaitée.

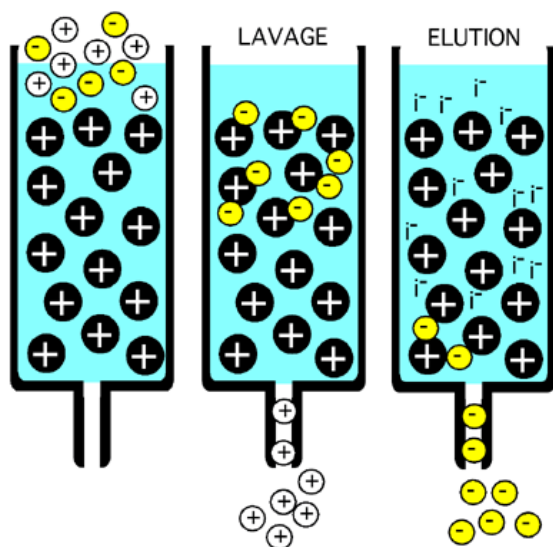


Figure 25: Schéma d'un système de chromatographie à échanges d'ions (111)

Les protéines acides vont fortement se fixer à la résine contrairement aux protéines basiques qui vont passer très rapidement dans se fixer sur la colonne.

En France, on utilise le procédé Sphérosil (112), qui utilise des billes de silice sur la surface desquelles ont été greffés des groupements échangeurs d'ions (Fauquant et al., 1985).

3.4.1.1.2.5 Hydrolyse par digestion enzymatique

Une dernière technique d'hydrolyse permet à partir d'isolat ou de concentrât, l'obtention d'hydrolysats de protéines très riches en peptides et en acides aminés libres. Cette forme, permettrait une assimilation plus rapides des acides aminés par le muscle. La majorité des études, ne montre aucun bénéfice de l'hydrolysat par rapport à un isolat. L'hydrolyse maîtrisée des protéines peut également permettre de supprimer leur pouvoir allergisant, et elles pourront donc être utilisées pour la fabrication de produits hypoallergéniques

3.4.1.1.2.6 Séchage

Afin d'obtenir la forme galénique de poudre connue par tous les consommateurs de whey, la méthode par atomisation/pulvérisation s'est imposé depuis les années 70 à l'échelle industrielle pour le traitement des produits comme le lait (113).

Cette technique, permet d'éliminer l'eau et donc de stabiliser biologiquement les protéines. Elle consiste à pulvériser le produit à sécher dans un courant de gaz chaud de manière à obtenir une poudre (114).

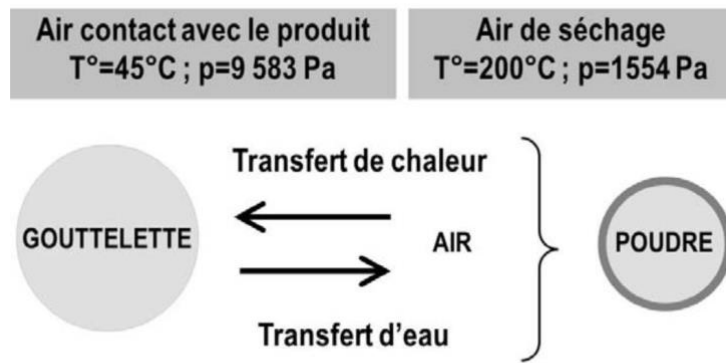


Figure 26: Transfert couplés de chaleur et d'eau entre une gouttelette et l'air de séchage (Jeantet et al, 2006)

Dans certaines conditions d'atomisation, la poudre peut, si la déshydratation n'est pas suffisante, coller aux parois métalliques de l'installation (thermoplasticité). (115)

3.4.1.2 La caséine

Dans le lait de vache, il existe plusieurs types de caséines, elles constituent la majeure partie des protéines contenues dans le lait, et sont souvent appelées « protéines lentes »

Caséine α_{S1}	40%
Caséine β	35%
Caséine κ	12%
Caséine α_{S2}	10%
Caséine γ	3à7%

Tableau 13: Composition des différentes parties de la caséine laitière

La structure spatiale des caséines est très différente de celle des protéines du lactosérum. La structure des caséines est très ouverte, en raison d'une teneur élevée en proline distribuée uniformément, qui limite la formation d'hélices α et de feuillets β (102). (Modler, 1985 ; Morr, 1985).

Contrairement à sa petite sœur, la caséine est une protéine anti-catabolique à assimilation lente. Elle représente 80% des protéines du lait. Elle est extraite par microfiltration (entre 0,1 et 0,2 microns).

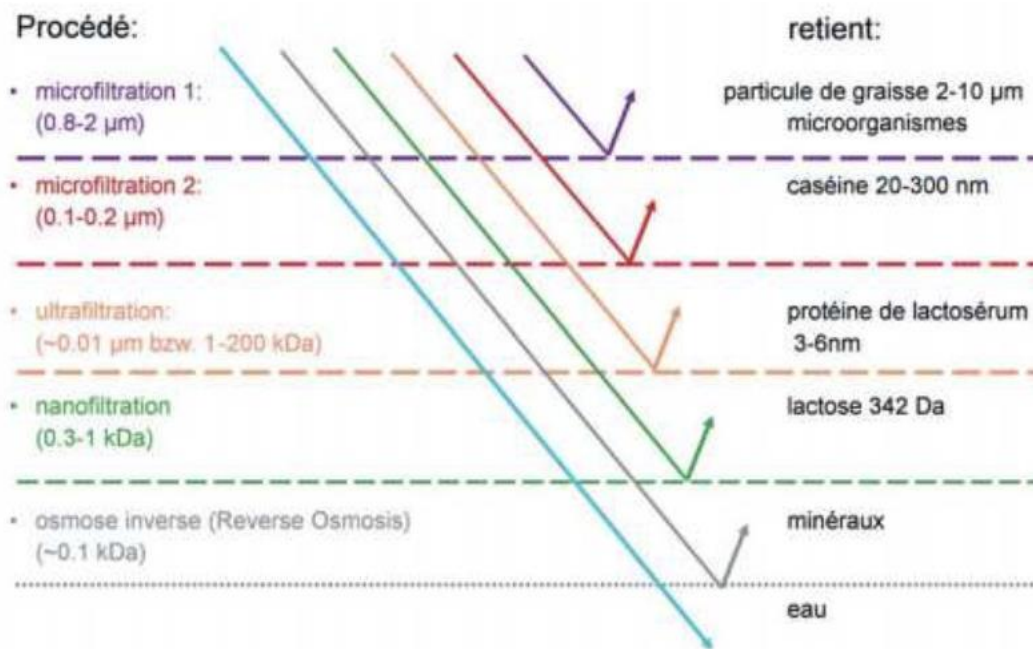


Figure 27 : Représentations des différentes filtrations en fonction de la taille des pores du filtre.

En 1997, le français Yves Boirie a révolutionné le milieu des protéines en poudre avec une étude qui a comparé les protéines de lactosérum et les caséines. Il en a conclu, que ces deux différents types de protéines présentes dans le lait étaient complémentaires (116).

3.4.1.3 Les gainers

Les gainers ne sont pas une sorte particulière de protéine laitière, il s'agit ici d'un mélange de protéines en poudre, de glucides et de bons lipides dont l'objectif est la prise de poids du sportif de manière plus saine.

Les weigt gainers, ont une place dans le milieu sportif pour faciliter l'absorption d'un nombre de calories plus importantes sans forcément se forcer à manger plus.

3.4.2 Les autres protéines animales

Les suppléments protéiques consommés dans le milieu sportif sont essentiellement obtenus à partir du lait. A côté de ce lactosérum et des caséines, on retrouve dans une moindre part d'autres origines animales.

3.4.2.1 Œuf

Les protéines issues des blancs d'œufs, étaient les plus utilisées jusque dans les années 90. Ils ont d'ailleurs fait l'objet de différentes études comme vu précédemment avec les protéines de lactosérum (117).

Acides aminés essentiels (mg/g de protéine)	Egg albumine
Tryptophane	11,8
Thréonine	34,1
Isoleucine	50
Leucine	68
Lysine	46,4
Méthionine + Cystéine	48,9
Phénylalanine + Tyrosine	81,5
Valine	60,2

Figure 28: Profil en acides aminés de la protéine d'œuf (118)



Figure 29: Modèle de protéines de blanc d'œuf en poudre de la marque MyProtein

3.4.2.1.1 Bœuf

Les protéines issues du bœuf qui ont le plus souvent mauvaise réputation et qui ne donnent pas envie aux sportifs. En effet, cette origine renvoie au scandale de la vache folle.

De plus, une protéine de bœuf auquel on ajoute un arôme chocolat par exemple dans l'inconscient des personnes, ne passe pas très bien.



Figure 30: Modèle de protéine de bœuf en poudre de la marque Scitec Nutrition

Il a été démontré que ces protéines n'influent pas plus sur les taux de cholestérol qu'une consommation de protéines végétales (119). Une étude de 2015 (120) montre qu'il n'existait pas de différence significative entre protéine de lait et protéine de bœuf, et que les deux augmentent de manière similaire la masse maigre et la force (121).

Acides aminés essentiels (mg/g de protéine)	Isolat de protéine de boeuf
Tryptophane	11
Thréonine	43
Isoleucine	42
Leucine	80
Lysine	85
Methionine + Cystéine	38
Phénylalanine + Tyrosine	78
Valine	56

Tableau 14: Composition en acides aminés essentiels pour la protéine de bœuf (122)

3.5 Les protéines végétales

Les compléments alimentaires à base de protéines végétales dans leur ensemble sont indispensables pour les sportifs végétariens.

L'athlète végétalien le plus connu dans le milieu du culturisme, est Jim Morris qui est devenu végétarien puis végétalien à l'âge de 50 ans, il gagna Master Olympia. Dans les sports de

force pure on retrouve Patrik Baboumian devenu végétalien en 2011 et remportant dans la même année le titre d'homme le plus fort d'Allemagne.

Le plus difficile pour le sportif végétalien est d'avoir l'apport calorique suffisant afin de prendre du poids et d'éviter la perte de masse musculaire.

Le marché mondial des protéines connaît actuellement une croissance forte qui devrait se poursuivre dans les années à venir, concernant le marché des protéines végétales pour l'alimentation humaine, les estimations prévoient une croissance moyenne annuelle supérieure à 5% sur la période 2008-2018 (123).

Les athlètes végétariens courent un risque plus élevé de carence en protéines que les autres athlètes. Un régime végétarien à base de plantes peut fournir toutes les exigences essentielles et non essentielles d'acides aminés pour la synthèse des protéines. Cependant, une attention particulière doit être accordée à la variété des sources d'acides aminés alimentaires consommés ainsi que la quantité de protéines et d'énergie contenues dans le régime alimentaire de l'athlète. Les athlètes végétaliens courent davantage le risque d'une carence en protéines parce que leur alimentation manque complètement de sources de protéines animales. On s'inquiète également de ce que l'organisme utilise moins efficacement les protéines provenant de sources végétales que les protéines animales. Bien que les régimes végétarien et végétalien puissent fournir suffisamment de protéines, si ce n'est pas le cas, d'autres protéines alimentaires ou supplémentaires pourraient être envisagées. (124)

3.5.1 Le Soja

L'utilisation du Soja et de ses dérivés (tofu, miso) est depuis des milliers d'années tradition dans les pays d'Extrême Orient(125) alors qu'il est considéré comme source protéique pour les pauvres en Occident. Il faudra attendre le XXème pour que ce dernier se développe en Occident plus particulièrement aux Etats-Unis qui cultive à grande échelle le soja.

Le soja en poudre est considéré pour les végétaliens comme la meilleure solution de remplacement du lactosérum et caséine pour leur complémentation protéique.

Elle a une valeur biologique égal à 74 contre 100 pour rappel pour la whey protein et un score de PDCAA égal à celui de la protéine de lactosérum c'est-à-dire 1.00 (pour l'isolat) (126).

La graine de Soja possède en elle, des facteurs que l'on peut qualifier d'antinutritionnels (127) dans la mesure où ils interfèrent avec la digestion, l'absorption et la digestion des nutriments. Concernant la digestion des protéines, l'ingestion de graines de soja crues, par l'inhibition deux enzymes digestives, la trypsine et la chymotrypsine, par le facteur de Kunitz et le facteur de Bowman-Birk (=facteurs antitrypsiques) (128), entraîne une altération de la digestion. Il existe également la soyine dans la graine, qui après fixation au niveau de la muqueuse intestinale, va empêcher l'absorption des acides aminés et de la vitamine B12. Certains de ces facteurs sont thermolabiles, comme la soyine et le facteur de Kunitz, il existe donc des procédés industriels basés sur l'échauffement de la graine afin de diminuer la concentration de ces facteurs antinutritionnels (129), comme le toastage qui consiste à chauffer les graines par de la vapeur, la torréfaction des graines dans un milieu sec contrairement au précédent ou encore l'extrusion où la graine pré-chauffée dans un conditionneur à des températures avoisinant les 140°C sous une pression comprise entre 30 et 80 bars. Il existe encore d'autres procédés que nous ne détaillerons pas (le jet sploding, la micronisation, le floconnage, l'expansion, la granulation), le procédé d'extrusion sèche est le plus performant au niveau énergétique.

Le soja est une protéine qui possède la totalité des acides aminés essentiels et est riche en acides aminés branchés ainsi qu'en glutamine et lysine, ce qui en fait une protéine très attrayante (130). Elle peut être séparée en trois catégories : la farine, le concentré et l'isolat de soja.

Acides aminés Essentiels	mg/g de protéine
Lysine	63,4
Méthionine + Cystéine	68,1
Tryptophane	11,4
Thréonine	38,4
Leucine	85,1
Isoleucine	47,1
Valine	49,1
Histidine	25,4
Tyrosine + Phénylalanine	96,6

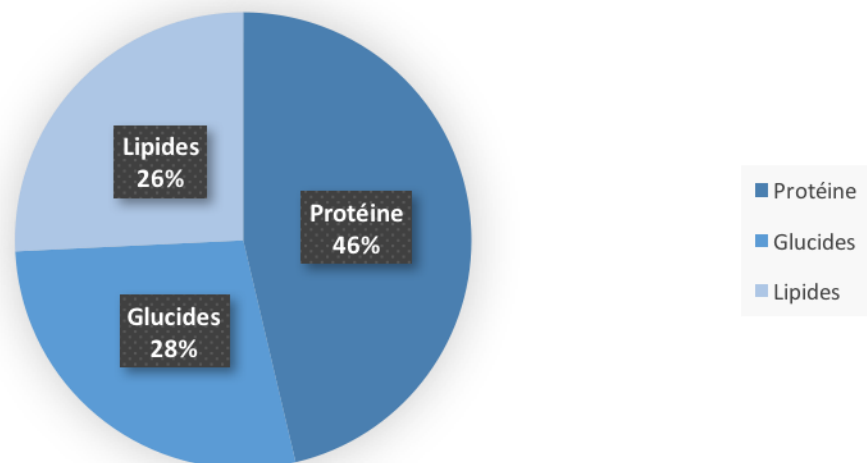
Tableau 15 Composition en acides aminés essentiels pour la protéine de soja (131)

Catégorie	% de protéine
Farine	50%
Concentrât	70%
Isolat	90%

Tableau 2 Composition en protéines selon les catégories de soja

Ces protéines en poudre de soja, sont fabriqués à partir de graine de soja dégraissées, les isolats sont les produits les plus raffinés avec une plus importante concentration de protéines et pas de fibres alimentaires.

Composition moyenne de la graine de soja (g/100g)



Source : <https://ciqual.anses.fr>

Afin de produire des isolats de protéines de soja, les étapes de bases d'extraction sont connues depuis de nombreuses années. Elles comportent le mouillage des farines ou des

flocons de soja avec de l'eau dans une cuve mélangeuse, ce mélange entre dans un décanteur afin de séparer les éléments non-protéiques (fibres, solides) et enfin la précipitation, la séparation et le séchage des protéines. Certains industriels ont créé des solutions complètes pour l'obtention d'isolats de soja comme le Flottweg (117). Ce dernier est imagé ci-dessous, où toutes les étapes de séparations et de décantations sont présentes.

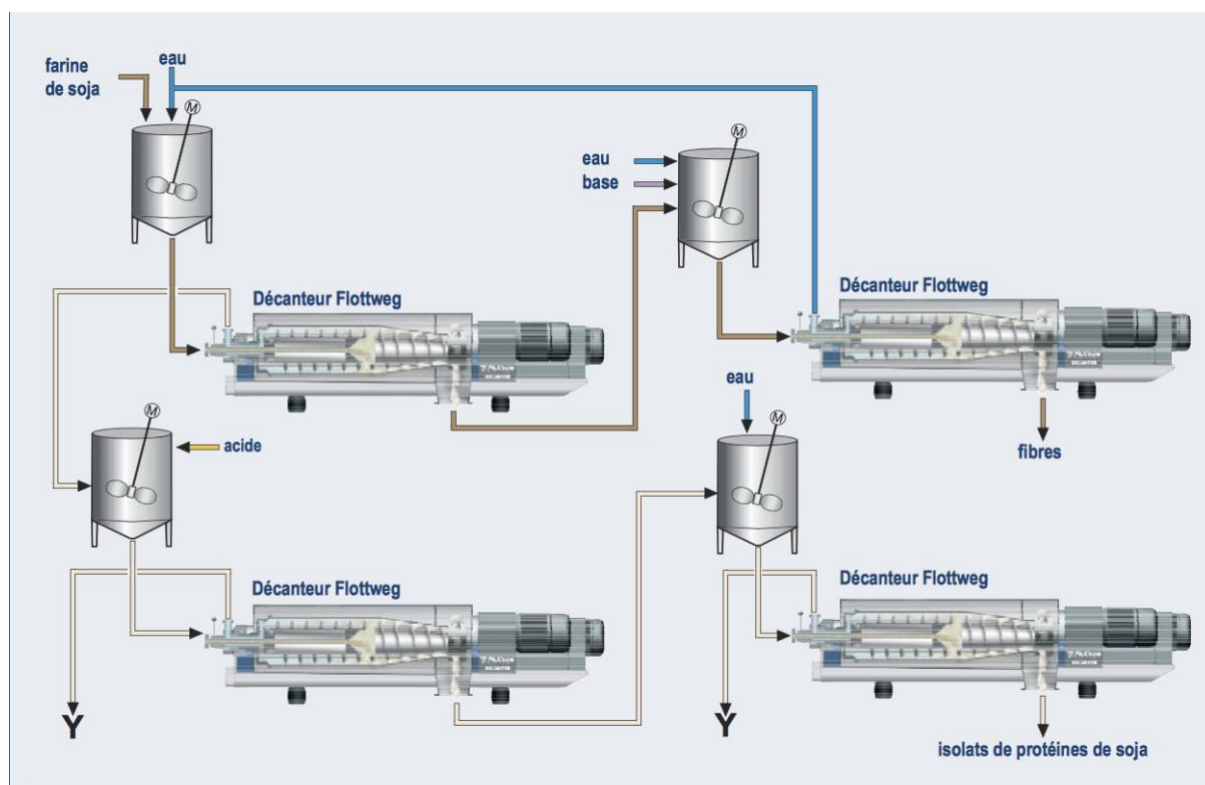


Figure 31 Procédé de production d'isolats de protéines de soja (132)

La figure ci-dessus montre bien les procédés pour obtenir les isolats de protéines de soja.

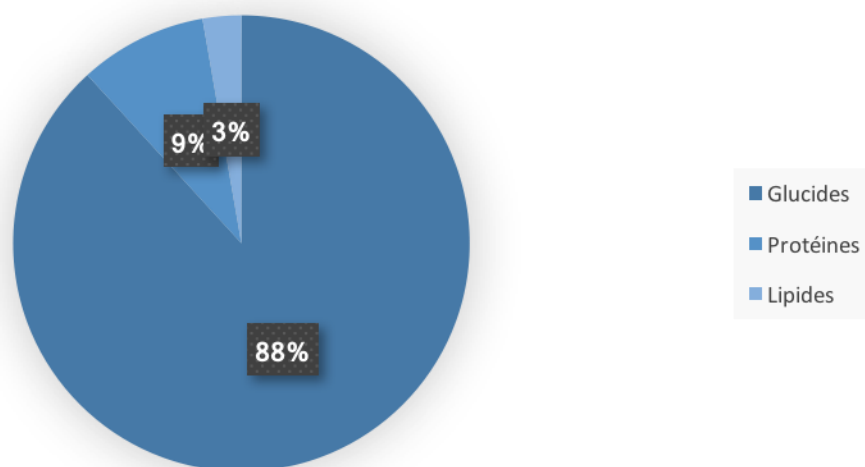
3.5.2 Le riz

Le riz est la denrée alimentaire de base dans 39 pays, mais la dépendance à l'égard du riz pour l'énergie alimentaire est beaucoup plus forte en Asie que dans les autres régions (FAO, 1984). Tout comme le soja, la protéine de riz contient tous les acides aminés essentiels. L'inconvénient premier de cette source qu'est le riz brun, comme pour le soja, est la présence en grande quantité, de facteurs antinutritionnels, qui sont concentrés dans la fraction de la

graine constituant le son. Ils comprennent la phytine, l'inhibiteur de la trypsine, l'oryzacystatine et l'hémagglutinine-lectine. Tous ces facteurs à l'exception de la phytine sont des protéines sujettes à dénaturation par la chaleur. L'acide phytique est une substance qui se lie à certains minéraux (Zinc, Fer et Calcium), les empêchant d'être absorbés par l'organisme. La solution des industriels pour éliminer ce facteur, est l'utilisation de riz brun germé. En effet, le trempage ou la germination permettent ainsi de libérer l'enzyme qui attaque l'acide phytique (La phytase), si bien que sa teneur finit par diminuer mais rarement plus de 60% (133).

Le riz est à la base une source de glucides pour l'homme, avec près de 88 grammes pour 100 grammes de riz. Il peut être après transformation, utilisé comme source de protéines.

Composition moyenne en macronutriments du riz cargo (g/100g)



Source : FAO

Les protéines de l'endosperme (tissu végétal de réserves nutritives dans la graine) se composent de plusieurs fractions : 15% d'albumine (soluble dans l'eau), plus globuline (soluble dans les sels), de 5 à 8 % de prolamine (soluble dans l'alcool) et le reste de glutéline (soluble dans les alcalis) (Juliano, 1985b).

En ayant recours à l'extraction séquentielle des protéines, on a obtenu la répartition moyenne suivante sur 33 échantillons : 9 % de prolamine, 7 % d'albumine plus globuline et 84 % de glutéline (Huebner et al., 1990).

Une étude (134) démontre que les protéines de riz peuvent modifier le métabolisme des triglycérides, entraînant une amélioration du poids corporel et de l'adiposité. Les résultats suggèrent que l'action hypolipidémiant ainsi que le potentiel d'anti-adiposité induit par la protéine de riz sont attribués à une régulation positive de la lipolyse et à une régulation négative de la lipogénèse, et que la digestibilité des protéines de riz pourrait être le principal modulateur.

Acides aminés essentiels (mg/g de protéine)	Isolat de protéine de riz
Tryptophane	14
Thréonine	35
Isoleucine	41
Leucine	80
Lysine	31
Méthionine + Cystéine	49
Phénylalanine + Tyrosine	101
Valine	58
Histidine	22

Tableau 16: Profil en acides aminés essentiels d'un isolat de protéine de riz (135)

Son de riz dégraissé (10g) + eau déminéralisée

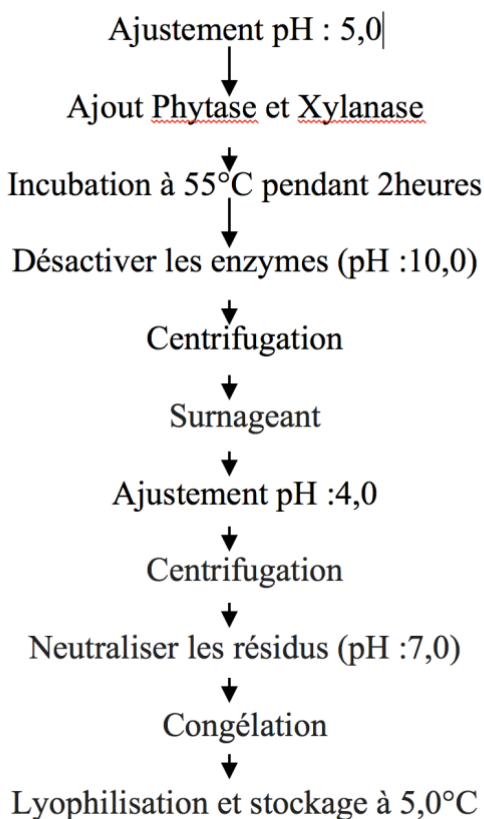


Figure 32: Procédé de préparation d'isolat protéique à partir de son de riz dégraissé non stabilisé (136)

L'isolat protéique de son de riz contenant environ 92,0% de protéines a été préparé à partir de son de riz non stabilisé et dégraissé en utilisant de la phytase et de la xylanase. Le rendement est passé de 34% à 74,6% grâce à l'utilisation du traitement enzymatique. Les solubilités azotées d'isolat étaient respectivement de 53, 8, 62, 78, 82 et 80% à des pH de 2,0, 4,0, 6,0, 8,0, 10,0 et 12,0. La calorimétrie différentielle à balayage a montré que cette dernière avait une température de dénaturation de 83,4 ° C. Ils ont des propriétés moussantes similaires au blanc d'oeuf. Mais les propriétés émulsifiantes étaient significativement plus faibles que celles de la sérumalbumine bovine. Le résultat de l'analyse des acides aminés a montré que le profil en acides aminés était similaire aux besoins des enfants de 2 à 5 ans par rapport à celui de la caséine et de l'isolat de protéine de soja.

Oryzatein® est la première source de protéine brevetée et respectueuse des allergènes du grain de riz entier, disponible en 80% et 90% de protéines. Fournissant tous les

acides aminés essentiels, ce produit est utilisé dans des produits de qualité alimentaire à la fois en remplacement et en conjonction avec la protéine de soja et la protéine de lactosérum.(137)

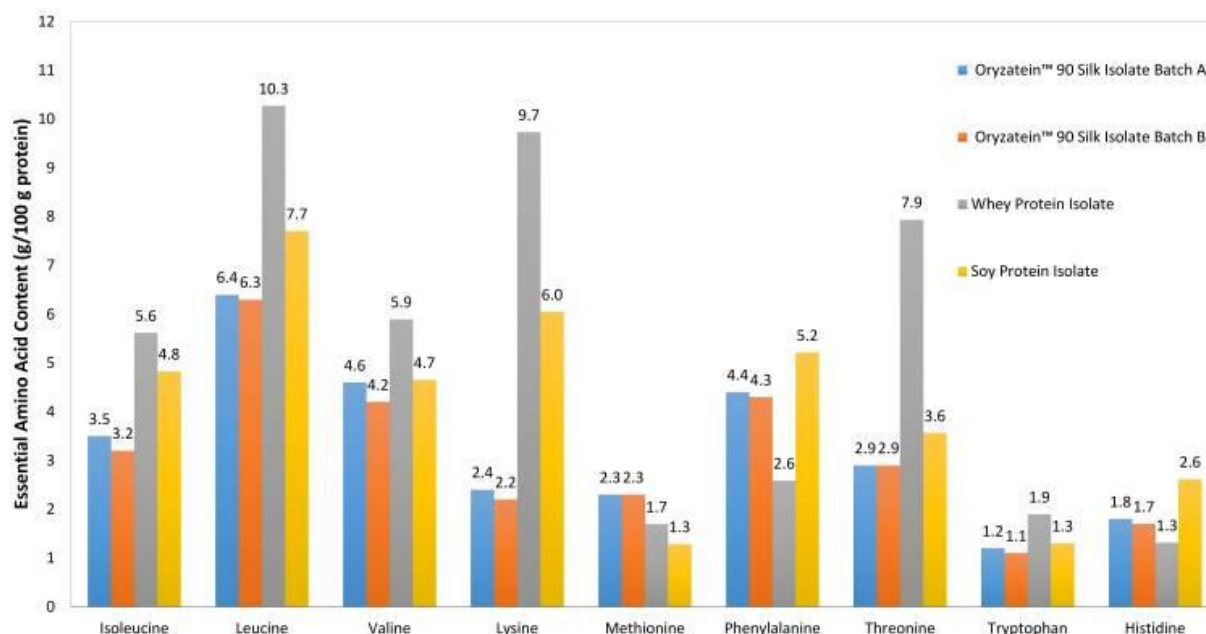


Figure 33: Profils en acides aminés des lots A et B de protéine de riz (Oryzatein), soja et protéines de lactosérum(138)

Ces résultats constituent un ajout précieux à la base de données sur les nutriments des isolats protéiques et des concentrés de céréales. Oryzatein-80, un concentré de protéine de riz brun biologique ou Oryzatein-90, un isolat de protéine de riz brun biologique, peut être utilisé à la place d'autres isolats ou concentrés de protéines sans aucune perte de valeur nutritive essentielle.

Dans le passé, des études ont montré que la combinaison de l'exercice de résistance avec la consommation de protéines d'origine animale avait un effet supérieur sur la croissance musculaire que lorsque l'effort était associé à la consommation de protéines végétales. Une étude américaine très récente, datant de 2013, a étudié deux groupes de 12 hommes qui ont suivi un même programme d'entraînement de musculation pendant 8 semaines, à raison de trois séances par semaine. Le premier groupe a reçu 48g de lactosérum alors que le second groupe a reçu 48 grammes de protéines de riz au même moment, c'est-à-dire à la fin de l'entraînement.

L'étude a conclu qu'il n'y avait aucune différence significative entre les gains de performances physique ou la composition des deux groupes. C'est-à-dire que la totalité des

athlètes ont gagné en force, en masse musculaire (masse maigre) et perdu de la masse grasse de la même manière. La protéine de lactosérum n'a donc pas démontré sa supériorité face à la protéine de riz lors de cette étude (135).

3.6 Y-a-t-il un moment idéal pour consommer ces suppléments protéiques

D'un point de vue historique, la chrono-diététique a été conceptualisée pour la première fois dans les années 70-80 (139) sur les glucides, et de plus en plus les études s'attardent sur l'effet des protéines et des acides aminés, avec et sans glucides.

Des recherches ont démontré que l'ingestion minutée de glucides, de protéines et de graisses peut affecter de manière significative la réponse adaptative à l'exercice. On peut donc se demander si le moment d'ingestion de suppléments est important pour un effet optimal sur le turn-over du métabolisme protéique, la récupération et la réparation tissulaire.

La littérature scientifique associée à la synchronisation d'ingestion des nutriments est un domaine de recherche extrêmement populaire et donc en constante évolution. Après avoir examiné la documentation disponible, les conclusions sont fournies par la Société Internationale de Nutrition Sportive (ISSN).

Un athlète avant un entraînement partira avec un stock de glycogène, ce stock peut être plus ou moins important en fonction du niveau d'entraînement de ce dernier mais également d'une alimentation riche en glucides. L'ingestion d'acides aminés libres et de protéines seul ou en combinaison avec des glucides avant l'exercice en résistance permet de stimuler au maximum la synthèse protéique.

L'ingestion de glucides seule ou en association avec des protéines pendant un exercice de résistance augmente le glycogène musculaire, compense les lésions musculaires et facilite

de plus grandes adaptations de l'entraînement après des périodes de supplémentation aiguës ou prolongées avec entraînement de résistance (140).

La période de récupération est le moment le plus opportun pour l'athlète de fournir les différents nutriments. En effet, il a été prouvé que la protéosynthèse est augmentée de 50% quatre heures après un entraînement et jusqu'à 109% à plus de 24 heures (141). Il est donc évident que la consommation de glucides dans les 30 minutes après l'arrêt de l'effort à forte dose stimule la resynthèse du glycogène musculaire. L'ajout de protéines à un rapport de 3 :1 peut encore améliorer cette resynthèse.

Les acides aminés, plus particulièrement les acides aminés essentiels sous forme libres, vont stimuler la synthèse des protéines musculaires, il en est de même pour l'ingestion de protéines de haute valeur biologique.

Il a été démontré au cours d'un entraînement de résistance constant et prolongé que la consommation en post-exercice de doses variables de suppléments glucides-protéines à des doses variables stimule l'amélioration de la force et de la composition corporelle par rapport aux conditions témoins ou placebo (142).

On parle très souvent de « fenêtre anabolique » qui serait la période où on assimilerait mieux les nutriments, typiquement les protéines, et qui est connu pour être les trois premiers quart d'heure après l'arrêt de l'effort. Or de nombreuses études ont montré que cette fenêtre était bien moins précoce et bien plus longue. Elle s'étalerait de 2 heures après l'entraînement et jusqu'à 36 heures.

Une étude récente datant 2009 par Hoffman et al. a étudié l'effet de 10 semaines de consommation de suppléments de protéines sur la force, la puissance et la composition corporelle chez 33 hommes formés au sport de force. Les résultats ne sont pas en adéquation avec ce qui a été dit précédemment, ce qui pourrait être expliqué par la faible durée de l'étude. Les participants ont été assignés au hasard à un supplément de protéine fourni le matin et le

soir (n = 13) ou fourni immédiatement avant et immédiatement après des séances d'entraînement (n = 13). A côté de ces participants supplémentés, 7 appartiennent au groupe témoin et n'ont pas utilisé de protéines ou d'autres suppléments nutritionnels. Au cours de chaque session de test, les participants ont été évalués selon le 1RM provenant de l'anglais « One repetition maximum » c'est-à-dire le poids maximum permettant d'effectuer une unique répétition pour la force au développé couché (DC) et au squat, la puissance grâce à 5 répétitions exécutées à 80% de 1RM au développé couché et au squat et la composition corporelle. Un effet principal significatif pour les trois groupes dans l'amélioration de la force a été observé dans le DC 1RM ($120,6 \pm 20,5$ kg contre $125,4 \pm 16,7$ kg aux tests de la semaine 0 et de la semaine 10, respectivement) et le squat 1RM ($154,5 \pm 28,4$ kg contre $169,0 \pm 25,5$ kg aux tests de la semaine 0 et de la semaine 10, respectivement). Cependant, aucune interaction significative entre les groupes n'a été observée au DC 1RM ou squat 1RM. Des effets principaux significatifs ont également été observés dans la puissance maximale et la puissance moyenne du haut et du bas du corps, mais aucune différence significative n'a été observée entre les groupes. Aucun changement dans la masse corporelle ou le pourcentage de graisse corporelle n'a été observé dans aucun des groupes. Les résultats indiquent que le moment d'ingestion de suppléments ou la simple prise de suppléments de protéines chez les pratiquant de sport de force pendant un programme d'entraînement de 10 semaines n'apporte aucun avantage supplémentaire à la force, à la puissance ou aux modifications de la composition corporelle (143)(144) tout en gardant à l'esprit que l'étude n'a duré que 10 semaines et ne concernait que 33 participants.

3.7 Quelle quantité consommer ?

Maintenant que nous avons vu quand consommer le supplément protéique, nous allons nous intéresser à la dose optimale de protéine nécessaire pour un anabolisme le plus performant.

Une étude de Moore et al. (2008), chez des jeunes hommes d'environ 80 kg préalablement entraînés dans les sports de force, a conclu que la dose optimale de protéine de lactosérum est de 20 grammes suite à l'entraînement. Alors qu'en 2014, une équipe de chercheurs a montré que les protéines de petit-lait (6,25g) combinés à 5g de leucine, stimule la protéosynthèse autant qu'un apport de 25g de protéines de lactosérum (145).

3.8 Quelles sont les preuves de leur efficacité ?

L'EFSA (European Food Safety Authority) a validé pour les protéines trois allégations de santé dont deux qui nous intéressent qui sont : « Les protéines contribuent au maintien de la musculaire » et « les protéines contribuent à augmenter la masse musculaire ». Ces deux allégations ne peuvent être utilisées que pour une denrée alimentaire qui est au moins une source de protéines au sens de l'allégation SOURCE DE PROTEINES définie dans l'annexe du règlement (CE) n°1924/2006 (146).

A l'heure actuelle, il existe de nombreuses études en faveur de la supplémentation en protéine et de leurs effets positifs sur la synthèse protéique, par ailleurs certaines études montrent qu'un régime hyper protéiné n'améliore pas cette synthèse. Nous avons vu dans la partie sur le sportif de force, que Tarnopolsky et al. en 1988 semblé penser qu'il existait un plafonnement des synthèses protéiques, et que l'apport excédentaire des acides aminés alimentaires étaient soit oxydés soit éliminés.

Une étude portée sur neuf haltérophiles expérimentés ont soit reçu de l'eau (=témoin), soit un supplément de glucides, soit un supplément de protéines ou encore un supplément de glucides et protéines immédiatement après l'entraînement et également deux heures plus tard. Les résultats montrent qu'une supplémentation en protéines et glucides simultanée a conduit à

une augmentation des concentrations de l'hormone de croissance et l'insuline, qui sont deux hormones anabolisantes. La prise de supplément protéique et une source de glucides permettent de créer un environnement hormonal idéal pour la synthèse protéique (147).

Il a été démontré qu'après 14 semaines d'entraînements et d'ingestion chronique d'un supplément de protéines de lactosérum, une augmentation de la section des fibres musculaires lentes et rapides (148).

3.9 Quel supplément choisir ?

Pour un athlète le premier critère pour choisir le type de supplément qui lui conviendra sera de savoir son type de régime, végétalien, végétarien ou carné.

Certains athlètes mêmes s'ils peuvent consommer des suppléments d'origine laitière sont intolérants au lactose, pour ces derniers on privilégiera la forme Isolat de lactosérum ou les protéines végétales.

Le sportif, pourra combiner plusieurs types de suppléments. En effet, on retrouvera le plus souvent une whey protéine ou un isolat de whey protéine à la fin d'un entraînement ou en collation. Par contre, un supplément de caséine sera plus adapté au coucher pour son action retardée et anti-catabolique (149).

Il a été comparé dans une étude, la réponse de synthèse musculaire à la suite d'ingestion de protéines rapides (hydrolysate de lactosérum et d'isolat de protéine de soja) et de protéines lentes (caséine micellaire) au repos et après un entraînement. A l'aide d'un marquage de la Phénylalanine au carbone 13, il a été possible d'étudier la synthèse protéique. Il a été déterminé par résultat statistique significatif que l'ingestion de lactosérum a digestion rapide entraîné une augmentation plus importante des concentrations sanguine en acides aminés indispensables en particulier en acides aminés à chaînes ramifiées par rapport au soja et à la caséine. La protéosynthèse est également plus augmentée avec en première place, la

consommation d'hydrolysate de lactosérum, en seconde place on retrouve le soja et enfin la caséine, avec une différence entre les extrêmes de 122% en post entraînement. Ces résultats sont valables au repos mais également après un entraînement, et peuvent être expliqués par la vitesse de digestion et éventuellement dû à des petites différences dans la teneur en leucine. On peut donc extrapoler ces résultats pour dire qu'un athlète pourra également choisir son type de suppléments selon les études sur ces derniers (150).

Une synthèse récente conclut plutôt que le petit-lait serait plus efficace que les protéines de soya pour faire augmenter la masse musculaire chez les hommes (151) alors que nous avons vu une étude américaine précédemment qui montrait la non différence entre les protéines de lactosérum et les protéines de riz brun(135)

En 2005, une étude également a étudié la différence d'hypertrophie musculaire dans deux groupes de 23 sujets jeune et en bonne santé avec une supplémentation en hydrate de carbone (glucides) ou avec une supplémentation uniquement de protéine deux heures avant et après chaque entraînement et le matin les jours de repos. Les résultats biologiques sont obtenus par biopsie musculaire au niveau du muscle vaste latéral, concernant les résultats mécaniques de performances, ils ont étudié la hauteur lors d'un saut vertical ainsi que le couple maximal.

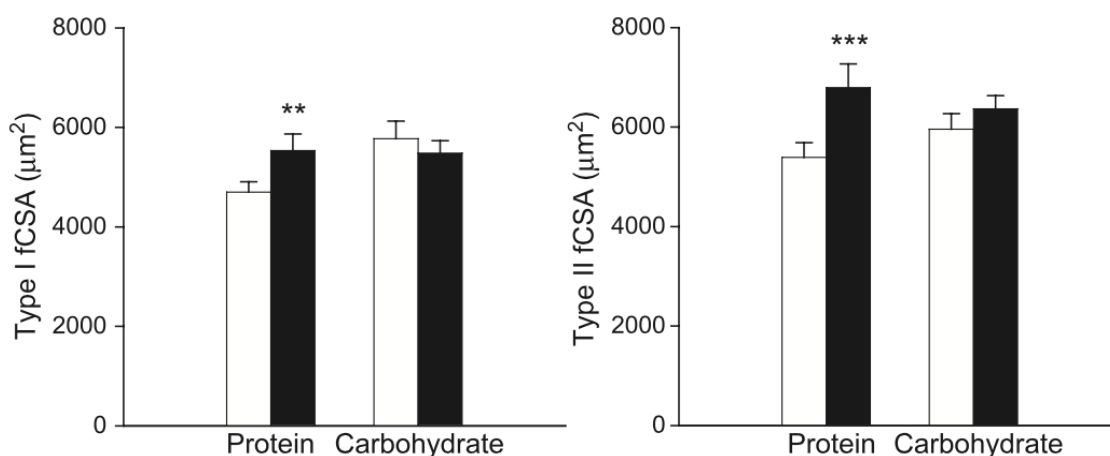


Figure 34: Diamètre des fibres de type I (à gauche) et de type II (à droite) avant (barre blanche) et après l'entraînement (barre noire) **Pvalue<01; ***Pvalue < .001. (148)

Cette étude a montré que le seul le groupe supplémenté par les protéines avait un gain de taille de section des fibres musculaire de type I et II plus important par rapport au groupe supplémenté en glucides. Il a été également montré que ce groupe protéique, les athlètes avaient gagné 9% (plus ou moins 2%) en hauteur lors d'un squat jump. Il n'a pas été mis en évidence de différence notable entre les deux groupes concernant le couple maximal lors de l'exercice de saut vertical. Il s'agit donc d'un avantage mineur et utile aux athlètes recherchant l'hypertrophie musculaire (148).

Alors qu'une étude australienne, publié en 2009, montre que l'absorption de lait fortifié (1000 mg de calcium, 800 UI de vitamine D3 et 13,2 g de protéines par jour) n'a aucun effet sur la taille, la force ou la fonction du muscle. Des données limitées ont suggéré que la consommation de lait après l'entraînement de résistance peut favoriser l'hypertrophie du muscle squelettique. Le but de cette étude était d'évaluer si un supplément nutritionnel à base de lait pouvait améliorer les effets de l'entraînement sur la masse musculaire, la taille, la force et la fonction chez les hommes d'âge moyen et plus âgés. Il s'agissait d'un essai contrôlé randomisé, dans lequel 180 hommes en bonne santé, âgés de 50-79 ans ont été répartis dans les groupes suivants.

Groupe 1 (n= 45)	Entrainement + Lait enrichi
Groupe 2 (n=46)	Entrainement
Groupe 3 (n=45)	Lait enrichi
Groupe 4 (n=44)	Témoin

Tableau 17: Répartition des différents groupes de l'étude

L'exercice consistait en un entraînement en résistance avec des exercices d'impact et également avec haltères. La masse maigre corporelle totale et la masse grasse, la section transversale musculaire moyenne, la force musculaire et la fonction physique ont été évaluées.

Après 18 mois, il n'y a pas eu de résultat significatif par la consommation de lait fortifiée pour la masse maigre totale du corps, le diamètre des fibres musculaire ou toute autre mesure fonctionnelle. Cependant, les analyses d'effets principaux ont révélé que l'activité

musculaire était significativement améliorée, avec une augmentation de la masse maigre, une diminution de la masse grasse, une évolution du diamètre musculaire ainsi qu'une plus grande vitesse de marche par rapport à l'absence d'exercice (152).

Il existe donc plusieurs études qui affirment ou qui infirment que la consommation de compléments protéiques peut être utile à la croissance musculaire.

3.10 Effet de la supplémentation et de l'entraînement

La disponibilité en acides aminés après un effort est le principal régulateur de la balance protéique. Une étude humaine (153) s'est donc penché sur les réponses de l'organisme à l'exercice et à la supplémentation en protéine, dans trois groupes différents.

Groupe 1 : Lactosérum	n=6
Groupe 2 : Caséine	n=8
Groupe 3 : Contrôle	n=7

Après une unique séance d'entraînement de force, les groupes ont consommé une boisson de lactosérum, de caséine marquée à la Leucine marquée au carbone 13 ou une boisson contrôle non calorique. Des échantillons de sang ont été prélevés avant et tout au long du protocole (9h) ainsi que quatre biopsies musculaire (voir Figure) au niveau du grand vaste externe de la jambe, qui est le muscle le plus typiquement utilisé lors de ces protocoles d'études.

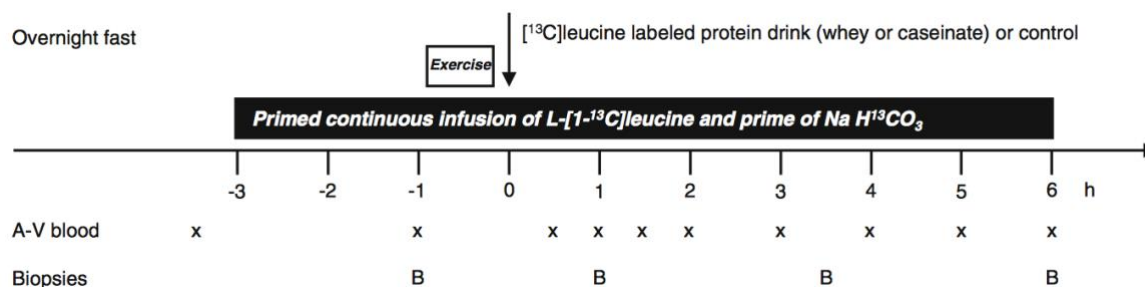


Figure 35: Protocole d'échantillonnage en fonction du temps

Pour rappel la régulation du renouvellement des protéines musculaires est en partie médiée par la signalisation en aval de l'IGF-1 et des récepteurs de l'insuline affectant synthèse et dégradation protéique via la protéine kinase B (Akt).

L'IGF-I est capable de réduire la dégradation des protéines en activant la voie Akt par la phosphatidylinositol 3-kinase, inhibant la fonction de la famille de facteurs de transcription homeobox de type Forkhead O (FOXO), régulant ainsi l'expression des atrogènes (= gènes relatif à l'atrophie), Atrogin1 (MAFbx) et RING(Really Interesting Novel Gene) finger-1(= MuRF-1)(154), qui sont des médiateurs centraux dans le système ubiquitine-protéasome (155).

Différents modèles d'atrophie musculaire, y compris le jeûne, la dénervation et l'immobilisation ont documenté que l'expression génique de MuRF1 et Atrogin1 est régulée positivement dans ces états cataboliques (156).

Ce qui nous intéresse surtout c'est ce qui concerne l'expression de l'ARNm de MuRF1 lors d'un exercice, il a été montré une augmentation de manière aiguë après une session d'exercice de résistance intense, bien qu'une étude ait rapporté une expression de MuRF et de Myostatine non affectées après 3h de récupération (157). (voir figure 31). En revanche, les résultats indiquent que l'ARNm Atrogin1 est diminué ou inchangé de manière aiguë après l'exercice (158).

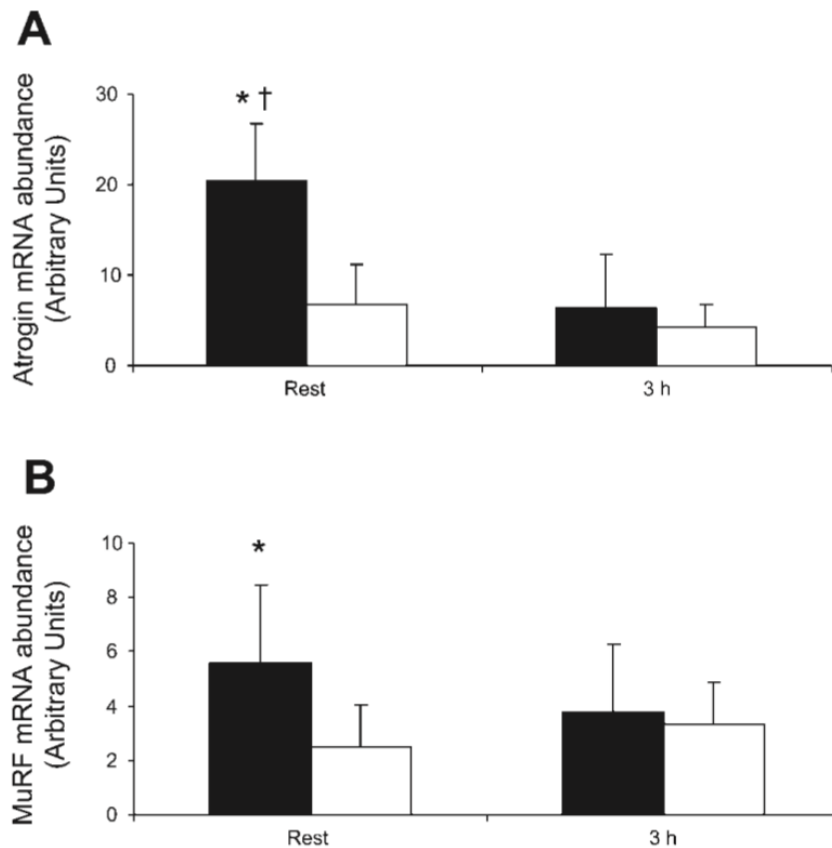


Figure 36: A) Variation de la concentration de l'Atrogin au repos et après un exercice standardisé. B) Variation de la concentration de MuRF au repos et après un exercice standardisé. *Différence significative $P < 0,01$

Dans l'ensemble, le lactosérum et la caséine sont tout aussi efficaces pour susciter une réponse anabolique des protéines fibrillaires dans la période de récupération suite à un seul exercice de résistance intense et avec des différences temporelles marquées (Lactosérum : 1-3,5h ; Caséine : 3,5-6h), due à la différence de temps de digestion entre les protéines rapides et lentes.

3.11 QUELQUES EXEMPLES DE SUPPLEMENTS PROTEIQUES

3.11.1 Généralités

Nous allons maintenant faire le tour de quelques marques très présentes dans le monde de la pratique sportive, Eafit® ; Eric Favre®, Scitec Nutrition® et enfin MyProtein®. Toutes les données qui vont suivre, ont été prises sur les différents sites et n'ont pas été étudié en laboratoire.

Eafit

Eafit est une marque de référence de supplémentation du sportif aux yeux des consommateurs en France. Sur leur site internet, ils se vantent d'une production à plus de 95% de leurs produits sur le territoire français et en Europe. Pour autant, ils ne mentionnent à aucun moment la provenance de leurs matière première (lactosérum).

En terme de qualité, la marque respecte le norme AFNOR NF V 94-001 qui pour rappel est une norme volontaire et le laboratoire est certifié ISO9001 :2008 pour les process de formulations et de distributions des produits. Ainsi que les normes de fabrications françaises et européennes (BPF, GMP, HACCP)

Eric Favre

« Un esprit sain dans un corps sain », telle est la devise de cette marque éponyme depuis 25ans.

Ce sont également des produits français, « garantissant aux clients traçabilité et qualité irréprochable » sans en savoir plus sur la provenance des matières premières malgré. Elle répond aux certifications ISO 22000, Ecocert et GMP.

Ce groupe de laboratoire est également engagé dans la santé et l'écologie avec l'association Worldriderz, Aqua Verde ou encore l'association de Pascal Olmeta « Un sourire, un espoir pour la vie »

Scitec Nutrition

Depuis sa création en 1996, Scitec Nutrition, marque Hongroise est très populaire dans le milieu du fitness et du Bodybuilding. En effet, elle est la marque et le sponsor officiel de l'International Fédération of Bodybuilding and Fitness, qui est l'une des compétitions les plus reconnu au monde.

Concernant la qualité de leurs suppléments, il est possible, à l'aide du numéro de lot du produit, d'accéder aux résultats des tests en laboratoire. Leur usine est certifié ISO

22000 :2005 (gestion de sécurité alimentaire), ISO 9001 (qualité), HACCP (sécurité des aliments) et cGMP.

Il est fait nullement mention que cette marque ne contient pas de produits dopants comme l'entend la réglementation.

My Protein

Très jeune marque anglaise, créée en 2004 par Oliver Cookson qui a réussi à s'implanter très vite et très fort sur le marché anglais et français à l'aide d'une politique de prix très bas et d'une communication dans l'air du temps.

Sur leur site, il est très difficile de connaître la qualité des produits. Nous savons qu'ils ont une gamme « Informed Sport » (159) qui garantit aux athlètes l'absence de produits dopant. Par contre, il s'agit pour ces produits d'une très petite partie de leur gamme ((13 produits/>300). Concernant les normes de fabrication, MyProtein répond aux normes ISO 9001, cGMP et HACCP.

3.11.2 Isolat de Lactosérum

	Pure Isolate Chocolat noir (EaFit)	Pure 100% Isolate chocolat (Eric Favre)	100% Whey isolate (Scitec)	IsoPro 97 nature (MyProtein)
Glucides	5,9	4,33	2,4	0
Dont sucre	0,9	2,21	2,4	0
Protéines	78	86,19	84	97
Lipides	2,1	0,97	0,4	1,7
Dont saturés	0,8	0,39	0,4	1

Tableau 18: Composition nutritionnelle de différents Isolate de lactosérum

Concernant ces quatre isolats, on remarque directement que l'IsoPro97 de chez MyProtein® a une composition nutritionnelle très intéressante du fait de l'absence de glucides et de lipides, ce qui peut faire croire à un procédé de filtration très poussé ainsi que sa concentration bien plus élevée en protéines que ces concurrents.

On retrouve donc un niveau minimal de 78% de protéines dans ces produits ce qui répond bien à la définition d'isolat.

	EaFit	Eric Favre	Scitec Nutrition	MyProtein	FAO
	Pure Isolate (chocolat noir intense)	Pure 100% Isolate chocolat	100% Whey isolate	ISO :PRO 97	Protéine de référence en AAI
	Valeur pour 100g (en g)	Valeur pour 100g (en g)	Valeur pour 100g (en g)	Valeur pour 100g (en g)	Valeur pour 100g (en g)
Alanine	4,7	4,22	5,0	4,7	
Arginine	2,1	1,82	2,1	2,3	
Ac. Aspartique	11,38	9,27	11	11,1	
Cystine	2,60	1,85	2,2	3,0	
Acide Glutamique	17,48	15,25	18,1	16,5	
Glycine	1,80	1,22	1,4	1,6	
Histidine	1,70	1,44	1,7	2,2	1,7
Isoleucine*	6,78	5,37	6,4	5,4	2,7
Leucine*	10,70	8,89	10,6	11,9	5,9
Lysine	10,38	8,04	9,6	11,1	
Méthionine	2,30	1,85	2,2	2,3	
Phénylalanine	3,00	2,55	3,0	3,5	
Proline	5,88	4,64	5,5	4,4	
Sérine	4,43	3,89	4,6	2,7	
Thréonine	6,98	5,63	6,7	4,4	2,5
Tryptophane	2,09	1,18	1,4	2,7	0,6
Tyrosine	3,00	2,20	2,6	3,5	
Valine*	5,39	4,99	5,9	5,5	2,7

Tableau 19: Aminogramme de différents isolats du marché. *Acides aminés Branchés. En rouge: Acides aminés essentiels.

Dans la comparaison de différents aminogrammes il est important de comparé la concentration en acides aminés indispensables, car non synthétisé par notre organisme.

Chez Eafit®, les proportions sont correctes, on pourrait s’attendre à une plus forte concentration en acides aminés branchés.

Chez Eric Favre®, on retrouve une concentration un peu faible en Histidine, qui est inférieur à la norme d’une protéine « idéal ». Dans cet isolate, on retrouve la plus faible concentration en Acides aminés à chaines ramifiés (19,25%). On retiendra également la faible teneur en Leucine, qui pour rappel est l’acide aminé signal de la protéosynthèse.

Chez ScitecNutrition® leur isolat est probablement le plus équilibré entre tous les acides aminés par rapport à la protéine de référence avec une concentration plus importante pour la glutamine.

L’isolat de MyProtein est pauvre en Thréonine qui participe au développement du système immunitaire mais également à la formation de collagène. On peut se demander au vu de la composition, si le laboratoire n’a pas fait subir un enrichissement à sa protéine.

3.11.3 Isolat de Soja

Nous allons pouvoir comparer différents isolats de protéines de soja afin de voir s’il existe des différences notables sur le marché.

	Protisoya Eafit	Protéines vegan EricFavre	SOY PRO Scitec	Soy protein isolat MyProtein
Glucides	5,6	6,75	18	5
Dont sucres	2,6	0,10	17	0,1
Protéines	69	78,66	71	90
Lipides	2,3	4,42	2,5	0,5
Dont saturés	1,2	1,05	0,7	0,1

Tableau 20: : Composition nutritionnelle de différents Isolate de protéine végétale

Le tableau 20 nous montre que les protéines de soja sont plus riches en glucides mais pas en sucre en tant que tel, «il en est de même pour les lipides mais les concentrations protéiques sont plus faibles que les protéines de lactosérum.

L'isolat de soja qui saute le plus aux yeux est celui de ScitecNutrition®, en effet pour 100g de poudre, on retrouve 18g de glucides dont 17g de sucres, ce qui est très important concernant un isolat.

	EaFit	Eric Favre	Scitec Nutrition	MyProtein	FAO
	SOJA	PROTEINES VEGAN	SOY PRO	Soy protein isolate	Protéine de référence en AAI
	Valeur pour 100g (en g)	Valeur pour 100g (en g)	Valeur pour 100g (en g)	Valeur pour 100g (en g)	Valeur pour 100g (en g)
Alanine	3,2	3,40	3,05	3,4	
Arginine	5,66	6,76	5,39	7,1	
Ac. Aspartique	8,95	8,91	8,23	10,6	
Cystine	1,6	0,81	0,92	0,6	
Acide Glutamique	13,29	13,14	13,56	24,4	
Glycine	3,2	3,21	2,98	3,5	
Histidine	1,7	1,94	1,85	2,3	1,7
Isoleucine*	4,01	3,51	3,23	4,0	2,7
Leucine*	7,02	6,54	5,82	6,6	5,9
Lysine	5,49	5,51	4,47	5,2	
Méthionine	1,9	0,92	0,92	1,1	
Phénylalanine	4,05	4,27	3,69	4,5	
Proline	4,52	3,52	3,62	3,7	
Sérine	3,68	4,14	3,69	4,0	
Thréonine	4,02	3,04	2,69	3,0	2,5
Tryptophane	1,00	0,78	0,92	1,1	0,6
Tyrosine	2,92	3,00	2,69	2,7	
Valine*	5,01	3,95	3,55	4,2	2,7

Tableau 21: Aminogramme de différents isolats végétales du marché. *Acides aminés Branchés. En rouge : Acides aminés essentiels.

Les protéines de soja en poudre sont comparable aux sources de protéines animales concernant leur aminogramme. Dans le tableau 18 on voit que tous les compléments sont riches en Arginine et en Glutamine, particulièrement la Soy Protein Isolate de MyProtein®.

Dans les quatre compléments cités ci-dessus, leur aminogramme sont très proches.

CONCLUSION

A l'origine, le but premier de cette thèse était de mettre à mal les nombreuses idées reçues restent ancrées dans l'esprit des personnes en 2018, tel que les dysfonctions rénales engendrées par un apport trop important de protéines, considérer l'utilisation de compléments alimentaires en tant que dopage, conserver dans l'esprit que les protéines proviennent forcément de l'animal et d'autres.

Les protéines ont été de nombreuses fois étudiées, de par leur structure en chaînes d'acides aminés, que par leur synthèse ou leur régulation métabolique par les hormones (Insuline, Hormones thyroïdiennes, Glucagon) ou par l'état nutritionnel.

Le sportif de force aura une structure musculaire plus riche en fibres de type II (IIb et IIa) que le sportif d'endurance. L'entraînement associé à un régime hyperprotéiné permet aux sportifs de s'adapter musculairement parlant en synthétisant de nouvelles fibres via les cellules satellites ainsi que par le développement des diamètres des fibres déjà existantes.

L'apport en protéine nécessaire selon les recommandations actuelles sont de 0,83 g/kg de poids par jour, chez le sujet sportif et plus précisément sportif de force, l'apport pour un maintien musculaire l'apport recommandé se trouve entre 1,3 et 1,5 g/kg/j alors qu'un sportif dans une phase de gain de masse musculaire aura une fourchette entre 1,8 et 2,5 g/kg/j ne dépassant pas une période de plus de 6 mois. Ces recommandations sont probablement amenées à changer dans le futur, si des nouveautés sont découvertes. Des différences au niveau internationale s'expliquent par les divergences entre les études cliniques faites et leur moyen d'analyse. A côté de cela, il existe le lobbying du monde sportif, du bodybuilding en particulier qui est très puissant aux Etats-Unis qui prône la surconsommation de protéines et également de compléments alimentaires.

Il est également important de noter que la quantité seule ne suffit pas mais que la qualité des protéines consommées va de paires. Différentes méthodes comme le coefficient d'efficacité protéiques, le coefficient d'utilisation digestive et l'utilisation protéiques neutre

sont utilisées afin de classer les protéines selon leur qualité. On retiendra que l'indice chimique reste pour les industriels le moyen le plus utilisé pour le marketing alors qu'il ne reflète pas au mieux la véritable qualité.

Les denrées alimentaires servant de suppléments protéiques sont de plus en plus réglementées, en Europe par la directive 2009/39/CE du parlement européen. Pour les consommateurs, des normes de qualité existe en particulier la norme ISO et une norme les protégeant d'un contrôle positif aux produits dopant. Ces normes sont des normes volontaires, qui devraient selon moi devenir obligatoires pour protéger le consommateur un maximum.

Les protéines en poudre les plus utilisées sont les protéines de lactosérum, en effet de par leur bas coût par les industriels mais également pour le sportif ainsi que l'aminogramme complet du produit. Différentes méthodes permettent de les extraire, les plus utilisées reste les procédés mécaniques (micro et ultrafiltration). De plus en plus, de sportifs sont végétariens ou végétaliens, ce qui les empêchent pour ces derniers de consommer des protéines provenant d'animaux. On retrouve donc des protéines en poudre provenant du règne végétal comme le soja, le riz ou les pois. Nous avons vu que certaines études montraient la supériorité des protéines de soja comparé aux protéines de lactosérum alors que d'autres mettent en évidence l'inverse. Il reste donc encore beaucoup à analyser afin de connaître au mieux chaque protéine.

Comme pour la quantité de protéines vu précédemment, le moment de prise de ces suppléments protéiques diffère selon les études, on retrouve le plus souvent une prise de protéines dans l'heure qui suit l'arrêt de l'effort ce qui coïnciderait avec une augmentation de la protéosynthèse musculaire afin de donner aux tissus le meilleur milieu nutritif pour se réparer. Les athlètes consomment entre 20 et 25 grammes de protéines pendant cette période.

Le choix de ces protéines se fait pour le sportif en fonction de la composition nutritionnelle, de l'aminogramme des protéines présentes sur les packagings ainsi que de ses convictions sur les sources de protéines.

Il est admis que seul 1/3 des besoins de l'athlète de force en protéine doivent être apporté par la supplémentation, et bien garder 2/3 des apports par l'alimentation.

BIBLIOGRAPHIE

1. Reeds PJ. Dispensable and Indispensable Amino Acids for Humans. *J Nutr.* 1 juill 2000;130(7):1835S-1840S.
2. Darmaun D. Qu'est-ce qu'un acide aminé essentiel en 2008 ? [Httpwwwem-Premiumcomdoc-Distantuniv-Lille2/fr/data/revues/098505620022000408001313](http://www.em-premium.com/doc-Distantuniv-Lille2/fr/data/revues/098505620022000408001313) [Internet]. 9 déc 2008 [cité 9 nov 2017]; Disponible sur: [http://www.em-premium.com.doc-distant.univ-lille2.fr/article/195454/resultatrecherche/1](http://www.em-premium.com/doc-distant.univ-lille2.fr/article/195454/resultatrecherche/1)
3. Gran P, Cameron-Smith D. The actions of exogenous leucine on mTOR signalling and amino acid transporters in human myotubes. *BMC Physiol.* 25 juin 2011;11:10.
4. affsa. Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations [Internet]. 2007 [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Proteines.pdf>
5. Traité de nutrition artificielle de l'adulte - Google Livres [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://books.google.fr/books?id=bID613IX8sEC&pg=PA85&dq=prot%C3%A9olyse&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKEwiuocbgg7fXAhXR4aQKHZzvCF0Q6AEIPjAF#v=onepage&q=structure%20quaternaire&f=false>
6. Dupin H. Alimentation et nutrition humaines. Esf Editeur; 1992. 1542 p.
7. Darmaun D. Métabolisme des protéines in vivo chez l'homme. [Httpwwwem-Premiumcomdoc-Distantuniv-Lille2/fr/data/traites/10-69562](http://www.em-premium.com/doc-Distantuniv-Lille2/fr/data/traites/10-69562) [Internet]. 24 août 2016 [cité 9 nov 2017]; Disponible sur: <http://www.em-premium.com.doc-distant.univ-lille2.fr/article/1075313/resultatrecherche/3>
8. Métabolisme des protéines et des acides aminés. In: Elsevier Masson. 2014 [cité 3 juin 2018]. Disponible sur: <https://www.decite.fr/media/pdf/feuilleter/9/7/8/2/2/9/4/7/9782294738517.pdf>
9. BOIRIE Y, BEAUFRÈRE B. MÉTABOLISME PROTÉIQUE. :1.
10. Obre E. Régulation du métabolisme énergétique: étude du remodelage bioénergétique du cancer. :210.
11. The Nobel Prize in Chemistry 2004 [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2004/
12. Schmidt M, Finley D. Regulation of proteasome activity in health and disease. *Biochim Biophys Acta.* janv 2014;1843(1):13-25.
13. Ben-Nissan G, Sharon M. Regulating the 20S Proteasome Ubiquitin-Independent Degradation Pathway. *Biomolecules.* 23 sept 2014;4(3):862-84.
14. Baehr LM, Tunzi M, Bodine SC. Muscle hypertrophy is associated with increases in proteasome activity that is independent of MuRF1 and MAFbx expression. *Front Physiol* [Internet]. 21 févr 2014 [cité 3 juin 2018];5. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3930915/>

15. Wagenmakers AJ. Protein and amino acid metabolism in human muscle. *Adv Exp Med Biol.* 1998;441:307-19.
16. Sherwood L. *Physiologie humaine.* De Boeck Supérieur; 2015. 712 p.
17. Umpleby AM, Russell-Jones DL. The hormonal control of protein metabolism. *Baillieres Clin Endocrinol Metab.* oct 1996;10(4):551-70.
18. Gatineau E. Impact d'un régime riche en saccharose sur la sarcopénie chez le rat âgé; Conséquences métaboliques au niveau hépatique et cérébral. Effets préventifs d'un mélange de micronutriments. *Spécialité.* :419.
19. Velloso CP. Regulation of muscle mass by growth hormone and IGF-I. *Br J Pharmacol.* juin 2008;154(3):557-68.
20. Human Muscle Protein Synthesis is Modulated by Extracellular, Not Intramuscular Amino Acid Availability: A Dose-Response Study - Bohé - 2003 - *The Journal of Physiology* - Wiley Online Library [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://physoc.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1113/jphysiol.2003.050674>
21. Buse MG, Reid SS. Leucine. A possible regulator of protein turnover in muscle. *J Clin Invest.* nov 1975;56(5):1250-61.
22. Oral Administration of Leucine Stimulates Phosphorylation of 4E-BP1 and S6K1 in Skeletal Muscle but Not in Liver of Diabetic Rats [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jnsv1973/48/1/48_1_59/_article
23. Obre E. Régulation du métabolisme énergétique: étude du remodelage bioénergétique du cancer. :210.
24. Marliss EB, Aoki TT, Pozefsky T, Most AS, Cahill GF. Muscle and splanchnic glutamine and glutamate metabolism in postabsorptive and starved man. *J Clin Invest.* avr 1971;50(4):814-7.
25. Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/36017/poulet-filet-sans-peau-cru>
26. Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/26161/saumon-cru-sauvage>
27. Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/20904/tofu-nature>
28. Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://ciqual.anses.fr/#/aliments/15001/cacahuete-ou-arachide>
29. Institut Français pour la Nutrition. Caractéristiques des différentes sources de protéines alimentaires [Internet]. 1997 [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: <http://alimentation-sante.org/wp-content/uploads/2011/07/dossier-scient-9bis.pdf>
30. Anses. Troisième étude individuelle nationale des consommations alimentaires [Internet]. 2017 juill [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/PRES2017DPA04.pdf>

31. Anses. Avis Etude INCA 3 [Internet]. 2017 juin [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0234Ra.pdf>
32. CONSOMMATION ALIMENTAIRE ET ETAT NUTRITIONNEL DE LA POPULATION VIVANT EN FRANCE [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/conso.pdf>
33. pmhdev. Skeletal Muscle - National Library of Medicine [Internet]. PubMed Health. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmedhealth/PMHT0025383/>
34. pmhdev. Endomysium - National Library of Medicine [Internet]. PubMed Health. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmedhealth/PMHT0025386/>
35. Louvet S. A theoretical model of skeletal muscular contraction : entropic springs, stochastic processes and classical mechanics [Internet]. 2013 [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00905034>
36. Schématisation contraction musculaire [Internet]. [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: <http://editimage.club/currentpic.html>
37. CERISIER N. Principes physiologiques de la contraction isométrique [Internet]. autourdutrail. [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: <http://www.autourdutrail.com/2014/12/principes-physiologiques-de-la-contraction-isometrique.html>
38. Bacou F, Vigneron P. Propriétés des fibres musculaires squelettiques. 1. Influence de l'innervation motrice. *Reprod Nutr Dév.* 1988;28(6A):1387-453.
39. INSERM. Activité physique et fonctions physiologiques [Internet]. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: http://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/97/Chapitre_15.html?sequence=718&isAllowed=y#Chap15-bib4
40. Brooke MH, Kaiser KK. Muscle Fiber Types: How Many and What Kind? *Arch Neurol.* 1 oct 1970;23(4):369-79.
41. IV – HETEROGENEITE DES MUSCLES SQUELETTIQUE : [Internet]. [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: <http://stapscrew.free.fr/Texte/Muscle3.htm>
42. Créatine : dopage, effets, dangers : la vérité [Internet]. Julien Venesson ♣ Site Officiel. 2012 [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: <https://www.julienvenesson.fr/creatine-dopage-effets-dangers-la-verite/>
43. Bacou F, Vigneron P. Propriétés des fibres musculaires squelettiques. 1. Influence de l'innervation motrice. *Reprod Nutr Dév.* 1988;28(6A):1387-453.
44. Detraining - wiki.sdstate.edu [Internet]. [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: http://wiki.sdstate.edu/User:slbednar/Blank_Page/What_is_Mitochondrial_Biogenesis/Aerobic_Exercise%2F%2FEndurance_Training/Anaerobic_Exercise_Training/Detraining
45. Matthias P. ETUDE EXPERIMENTALE DU CALCUL DE RESISTANCE MAXIMALE DU QUADRICEPS ; REP OU TSI ? :44.

46. Rand WM, Pellett PL, Young VR. Meta-analysis of nitrogen balance studies for estimating protein requirements in healthy adults. *Am J Clin Nutr.* janv 2003;77(1):109-27.
47. sante.gouv. CONSOMMATION ALIMENTAIRE ET ETAT NUTRITIONNEL DE LA POPULATION VIVANT EN FRANCE [Internet]. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <http://solidarites-sante.gouv.fr/IMG/pdf/conso.pdf>
48. Biolo G, Tipton KD, Klein S, Wolfe RR. An abundant supply of amino acids enhances the metabolic effect of exercise on muscle protein. *Am J Physiol.* juill 1997;273(1 Pt 1):E122-129.
49. Nutritional interventions to augment resistance training-induced skeletal muscle hypertrophy. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: [https://www.ncbi.nlm.nih.gov.doc-distant.univ-lille2.fr/pubmed/26388782?dopt=Abstract](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/doc-distant.univ-lille2.fr/pubmed/26388782?dopt=Abstract)
50. International Association of Sport Kinetics - Prof. Dr. Vladimir M. Zatsiorsky [Internet]. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.internationalsportkinetics.org/index.php/iask/honorary-members/18-prof-dr-vladimir-m-zatsiorsky>
51. Ferreira C, Heulin A. L'assiette du sportif: Recettes équilibrées avant/pendant et après l'effort, Conseils nutritionnels pour être au top, Idéa. Hachette Pratique; 2016. 218 p.
52. Inserm. Activité physique Contextes et effets sur la santé [Internet]. 2008 [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/084000534.pdf>
53. Université Rennes. adaptations_musculaires_a_lentrainement [Internet]. 2016 [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: https://www.univ-rennes2.fr/system/files/UHB/DEPARTEMENT-STAPS/DU/duoste_adaptations_musculaires_a_lentrainement_poly_etudiant_6_dia_par_page_22-11-16.pdf
54. Wilmore JH, Costill DL, Kenney L. Physiologie du sport et de l'exercice. De Boeck Supérieur; 2017. 644 p.
55. Tarnopolsky MA. Protein and physical performance. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* nov 1999;2(6):533-7.
56. Evans WJ. Protein nutrition, exercise and aging. *J Am Coll Nutr.* déc 2004;23(6 Suppl):601S-609S.
57. Alimentation du sportif [Internet]. Elsevier Masson, le blog. 2014 [cité 9 sept 2018]. Disponible sur: <http://www.blog-elsevier-masson.fr/2014/02/alimentation-du-sportif/>
58. Biolo G, Maggi SP, Williams BD, Tipton KD, Wolfe RR. Increased rates of muscle protein turnover and amino acid transport after resistance exercise in humans. *Am J Physiol.* mars 1995;268(3 Pt 1):E514-520.
59. Pitkanen HT, Nykanen T, Knuutinen J, Lahti K, Keinanen O, Alen M, et al. Free amino acid pool and muscle protein balance after resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc.* mai 2003;35(5):784-92.

60. Tipton KD, Wolfe RR. Exercise-induced changes in protein metabolism. *Acta Physiol Scand.* mars 1998;162(3):377-87.
61. Nutrition du sportif, apports macronutritionnels en fonction des disciplines - ScienceDirect [Internet]. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <https://www-sciencedirect-com.doc-distant.univ-lille2.fr/science/article/pii/S0985056214001319>
62. Biolo G, Maggi SP, Williams BD, Tipton KD, Wolfe RR. Increased rates of muscle protein turnover and amino acid transport after resistance exercise in humans. *Am J Physiol.* mars 1995;268(3 Pt 1):E514-520.
63. Tipton KD, Hamilton DL, Gallagher IJ. Assessing the Role of Muscle Protein Breakdown in Response to Nutrition and Exercise in Humans. *Sports Med.* 1 mars 2018;48(1):53-64.
64. Glass DJ. Skeletal muscle hypertrophy and atrophy signaling pathways. *Int J Biochem Cell Biol.* oct 2005;37(10):1974-84.
65. Glynn EL, Fry CS, Drummond MJ, Dreyer HC, Dhanani S, Volpi E, et al. Muscle protein breakdown has a minor role in the protein anabolic response to essential amino acid and carbohydrate intake following resistance exercise. *Am J Physiol-Regul Integr Comp Physiol.* 2 juin 2010;299(2):R533-40.
66. Insulin action on muscle protein kinetics and amino acid transport during recovery after resistance exercise. | *Diabetes* [Internet]. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <http://diabetes.diabetesjournals.org/content/48/5/949.short>
67. Tarnopolsky MA, MacDougall JD, Atkinson SA. Influence of protein intake and training status on nitrogen balance and lean body mass. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. janv 1988;64(1):187-93.
68. Bigard et guezennec. Alimentation du sportif [Internet]. Elsevier Masson, le blog. 2014 [cité 10 sept 2018]. Disponible sur: <http://www.blog-elsevier-masson.fr/2014/02/alimentation-du-sportif/>
69. Phillips SM. Protein requirements and supplementation in strength sports. *Nutr Burbank Los Angel Cty Calif.* août 2004;20(7-8):689-95.
70. Campbell B, Kreider RB, Ziegenfuss T, La Bounty P, Roberts M, Burke D, et al. International Society of Sports Nutrition position stand: protein and exercise. *J Int Soc Sports Nutr.* 26 sept 2007;4:8.
71. Lemon PW. Beyond the zone: protein needs of active individuals. *J Am Coll Nutr.* oct 2000;19(5 Suppl):513S-521S.
72. ISSN Exercise & Sport Nutrition Review: Research & Recommendations | Journal of the International Society of Sports Nutrition | Full Text [Internet]. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: <https://jissn.biomedcentral.com/articles/10.1186/1550-2783-1-1-1>
73. Poortmans JR, Carpentier A, Pereira-Lancha LO, Lancha A. Protein turnover, amino acid requirements and recommendations for athletes and active populations. *Braz J Med Biol Res.* 8 juin 2012;45(10):875-90.

74. Rennie MJ, Tipton KD. Protein and amino acid metabolism during and after exercise and the effects of nutrition. *Annu Rev Nutr.* 2000;20:457-83.
75. chole_doc_2009_-_besoin_en_prot_et_aa_et_qualite_des_prot.pdf [Internet]. [cité 29 mai 2018]. Disponible sur: http://sbssa.enseigne.ac-lyon.fr/spip/IMG/pdf/chole_doc_2009_-_besoin_en_prot_et_aa_et_qualite_des_prot.pdf
76. Maughan RJ. *Nutrition in Sport.* John Wiley & Sons; 2008. 699 p.
77. Blum M, Averbuch M, Wolman Y, Aviram A. Protein intake and kidney function in humans: its effect on « normal aging ». *Arch Intern Med.* janv 1989;149(1):211-2.
78. Tarnopolsky MA, Atkinson SA, MacDougall JD, Chesley A, Phillips S, Schwarcz HP. Evaluation of protein requirements for trained strength athletes. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. nov 1992;73(5):1986-95.
79. Institut français pour la nutrition. *Le métabolisme et les besoins protéiques chez l'homme.* [Internet]. 1997 févr [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <http://alimentation-sante.org/wp-content/uploads/2011/07/dossier-scient-9.pdf>
80. Food and Agriculture Organization of the United Nations, éditeur. *Dietary protein quality evaluation in human nutrition: report of an FAO expert consultation, 31 March-2 April, 2011, Auckland, New Zealand.* Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013. 66 p. (FAO food and nutrition paper).
81. Marie S, Laura K, Travis T D. *Nutrition for Sport, Exercise, and Health. Human Kinetics;* 2017. 488 p.
82. IDF Factsheet. *Interpretation of the protein quality methodology: Change to DIAAS* [Internet]. 2014 [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://www.fil-idf.org/wp-content/uploads/2016/03/IDF-Factsheet-Interpretation-of-Protein-Quality.pdf>
83. Mathai JK, Liu Y, Stein HH. Values for digestible indispensable amino acid scores (DIAAS) for some dairy and plant proteins may better describe protein quality than values calculated using the concept for protein digestibility-corrected amino acid scores (PDCAAS). *Br J Nutr.* févr 2017;117(4):490-9.
84. Ciqual Table de composition nutritionnelle des aliments [Internet]. [cité 2 juin 2018]. Disponible sur: <https://ciqual.anses.fr/>
85. Compléments alimentaires destinés aux sportifs : des risques pour la santé pour des bénéfices incertains | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <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>
86. Décret n°91-827 du 29 août 1991 relatif aux aliments destinés à une alimentation particulière | Legifrance [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=LEGITEXT000006071357&dateTexte=20151223>
87. Analysis of non-hormonal nutritional supplements for anabolic-androgenic steroids - results of an international study. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14986195>

88. Anses. Glossaire des fiches outils.pdf [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/GBPH2015SA0016.pdf>
89. Définition de l'HACCP [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: http://www.haccp-guide.fr/definition_haccp.htm
90. SYSTÈMES DE QUALITÉ ET DE SÉCURITÉ SANITAIRE DES ALIMENTS [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: http://www.fao.org/docrep/005/W8088F/w8088f22.htm#P0_0
91. Food and Drug Administration - Formulaire HACCP.pdf [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.fao.org/docrep/005/W8088F/w8088f34.pdf>
92. ISO 22000:2005(fr), Systèmes de management de la sécurité des denrées alimentaires — Exigences pour tout organisme appartenant à la chaîne alimentaire [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:22000:ed-1:v1:fr>
93. ANSM. Guide des Bonnes Pratiques de Fabrication.pdf. 2017.
94. Outil 1 : Le diagramme d'Ishikawa [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.esen.education.fr/conseils/traitement-des-donnees/operations/outils-de-diagnostic-structurants/outil-1-le-diagramme-dishikawa/>
95. Food Safety System Certification 22000 [Internet]. [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.fssc22000.com/documents/home.xml?lang=en>
96. economie.gouv. declaration-nutritionnelle-denrees-alimentaires.pdf [Internet]. 2017 [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/dgccrf/documentation/fiches_s_pratiques/fiches/declaration-nutritionnelle-denrees-alimentaires.pdf
97. Étiquetage alimentaire : un code couleur validé par le gouvernement [Internet]. <https://www.passeportsante.net/>. 2017 [cité 19 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.passeportsante.net/fr/Actualites/Nouvelles/Fiche.aspx?doc=etiquetage-alimentaire-code-couleur-gouvernement-nutritionnistes>
98. AFNOR. Communiqué de presse. [Internet]. 2012 [cité 20 mai 2018]. Disponible sur: <http://franceolympique.com/files/File/actions/sante/afnor.pdf>
99. Bianco A, Mammina C, Paoli A, Bellafiore M, Battaglia G, Caramazza G, et al. Protein supplementation in strength and conditioning adepts: knowledge, dietary behavior and practice in Palermo, Italy. *J Int Soc Sports Nutr.* 29 déc 2011;8:25.
100. Mahaney WC. Symposium on Ouaternary Environments, York University, Toronto, Canada, May 25, 1974. *Quat Res.* sept 1974;4(3):383-4.
101. FranceAgrimer. Le marché mondial du lactosérum [Internet]. 2013 [cité 20 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.franceagrimer.fr/content/download/26218/220370/file/SYN-LAI-2-Lactos%C3%A9rum.pdf>
102. Vuilleumard JC, Gauthier S, Paquin P. Les ingrédients à base de protéines laitières : obtention, propriétés et utilisations. *Le Lait.* 1989;69(4):323-51.
103. Académie de Strasbourg. dossier technique. :3.

104. Le lait et les produits laitiers dans la nutrition humaine - Laites d'animaux laitiers [Internet]. [cité 20 mai 2018]. Disponible sur: <http://www.fao.org/docrep/t4280f/T4280F04.htm>
105. L. MAUBOIS J. Separation, extraction and fractionation of milk protein components. *Le Lait*. 1984;64(645_646):485-95.
106. Ruettimann KW, Ladisch MR. Casein micelles: structure, properties and enzymatic coagulation. *Enzyme Microb Technol*. oct 1987;9(10):578-89.
107. Walstra P. On the Stability of Casein Micelles1. *J Dairy Sci*. 1 août 1990;73(8):1965-79.
108. El Khabbaze H. Traitement des solutions modèles du lait par des membraners de nanofiltration et d'osmose inverse [Internet]. [cité 20 mai 2018]. Disponible sur: http://toubkal.imist.ma/bitstream/handle/123456789/6917/THESE_EL%20KHABBAZE.pdf?sequence=1
109. Pouliot M, Pouliot Y, Britten M, Rodrigue N. Microfiltration de lactosérum doux sur membranes d'alumine : influence des conditions hydrodynamiques sur le colmatage. *Le Lait*. 1995;75(2):117-31.
110. Filtration sur membrane [Internet]. [cité 10 sept 2018]. Disponible sur: http://www.mybestform.com/fr/on_whey_gold_900/description.htm
111. Biochimie des protéines BCM514 [Internet]. [cité 10 sept 2018]. Disponible sur: <http://biochimiedesproteines.espaceweb.usherbrooke.ca/5e.html>
112. Proteines Laitieres. Ed. Techniques Ingénieur; 19 p.
113. Schuck P, Bouhallab S, Durupt D, Vareille P, Humbert J-P, Marin M. Séchage des lactosérums et dérivés : rôle du lactose et de la dynamique de l'eau. *Le Lait*. 2004;84(3):243-68.
114. Schuck P. Impact de la concentration et du séchage .pdf. 2011.
115. Schuck P, Bouhallab S, Durupt D, Vareille P, Humbert J-P, Marin M. Séchage des lactosérums et dérivés : rôle du lactose et de la dynamique de l'eau. *Le Lait*. mai 2004;84(3):243-68.
116. Boirie Y, Dangin M, Gachon P, Vasson MP, Maubois JL, Beaufrère B. Slow and fast dietary proteins differently modulate postprandial protein accretion. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 23 déc 1997;94(26):14930-5.
117. Allowances NRC (US) S on the TE of the RD. Protein and Amino Acids [Internet]. National Academies Press (US); 1989 [cité 6 juin 2018]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK234922/>
118. AMINO-ACID CONTENT OF FOODS AND BIOLOGICAL DATA ON PROTEINS [Internet]. [cité 6 juin 2018]. Disponible sur: <http://www.fao.org/docrep/005/AC854T/AC854T00.htm>
119. Wiebe SL, Bruce VM, McDonald BE. A comparison of the effect of diets containing beef protein and plant proteins on blood lipids of healthy young men. *Am J Clin Nutr*. nov 1984;40(5):982-9.

120. Sharp M, Shields K, Lowery R, Lane J, Partl J, Holmer C, et al. The effects of beef protein isolate and whey protein isolate supplementation on lean mass and strength in resistance trained individuals - a double blind, placebo controlled study. *J Int Soc Sports Nutr.* 21 sept 2015;12(Suppl 1):P11.
121. Sharp MH, Lowery RP, Shields KA, Lane JR, Gray JL, Partl JM, et al. The Effects of Beef, Chicken, or Whey Protein Post-Workout on Body Composition and Muscle Performance. *J Strength Cond Res.* 7 avr 2017;
122. Steinke FH, Waggle DH, Volgarev MN. *New Protein Foods in Human Health: Nutrition, Prevention, and Therapy.* CRC Press; 1991. 232 p.
123. Guéguen J, Walrand S, Bourgeois O. Les protéines végétales : contexte et potentiels en alimentation humaine. *Cah Nutr Diététique.* sept 2016;51(4):177-85.
124. SportsMD. Protein Supplementation in Athletes [Internet]. Sports Injuries, treatment and performance information. [cité 22 mai 2018]. Disponible sur: <https://www.sportsmd.com/sports-nutrition/protein/protein-supplementation-athletes/>
125. Friedman M, Brandon DL. Nutritional and Health Benefits of Soy Proteins †. *J Agric Food Chem.* mars 2001;49(3):1069-86.
126. Hoffman JR, Falvo MJ. PROTEIN – WHICH IS BEST? :13.
127. Gilani GS, Cockell KA, Sepehr E. Effects of antinutritional factors on protein digestibility and amino acid availability in foods. *J AOAC Int.* juin 2005;88(3):967-87.
128. Birk Y. The Bowman-Birk inhibitor. Trypsin- and chymotrypsin-inhibitor from soybeans. *Int J Pept Protein Res.* févr 1985;25(2):113-31.
129. Duc G. Valeur alimentaire et usages des graines de légumineuses. 1996 [cité 20 mai 2018];(8). Disponible sur: http://www7.inra.fr/lecourrier/wp-content/uploads/2013/04/Sauve-qui-peut-n%C2%B08_Duc.pdf
130. MICHELFELDER AJ. *American Family Physician.* 2009;79(1):5.
131. Nutritional Value of Proteins from Different Food Sources. A Review [Internet]. [cité 20 mai 2018]. Disponible sur: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/jf9400167>
132. Flottweg. Décanteur flottweg pour l'extraction d'isolats de protéines de soja [Internet]. [cité 20 mai 2018]. Disponible sur: https://www.flottweg.com/fileadmin/user_upload/data/pdf-downloads/Soja-Protein_FR.pdf
133. Perlas LA, Gibson RS. Household dietary strategies to enhance the content and bioavailability of iron, zinc and calcium of selected rice- and maize-based Philippine complementary foods. *Matern Child Nutr.* 1 oct 2005;1(4):263-73.
134. Yang L, Chen J-H, Lv J, Wu Q, Xu T, Zhang H, et al. Rice protein improves adiposity, body weight and reduces lipids level in rats through modification of triglyceride metabolism. *Lipids Health Dis.* 13 févr 2012;11:24.
135. Joy JM, Lowery RP, Wilson JM, Purpura M, De Souza EO, Wilson SM, et al. The effects of 8 weeks of whey or rice protein supplementation on body composition and exercise performance. *Nutr J.* 20 juin 2013;12:86.

136. Wang M, Hettiarachchy NS, Qi M, Burks W, Siebenmorgen T. Preparation and Functional Properties of Rice Bran Protein Isolate. *J Agric Food Chem.* févr 1999;47(2):411-6.
137. ORYZATEIN BROWN RICE PROTEIN POWDER [Internet]. Axiom Foods. [cité 22 mai 2018]. Disponible sur: <http://axiomfoods.com/beta/oryzatein-brown-rice-protein-powder/>
138. Kalman DS. Amino Acid Composition of an Organic Brown Rice Protein Concentrate and Isolate Compared to Soy and Whey Concentrates and Isolates. *Foods.* 30 juin 2014;3(3):394-402.
139. Karlsson J, Saltin B. Diet, muscle glycogen, and endurance performance. *J Appl Physiol.* août 1971;31(2):203-6.
140. Décombaz J. Protéines et acides aminés dans la récupération post-effort. *Sci Sports.* oct 2004;19(5):228-33.
141. MacDougall JD, Gibala MJ, Tarnopolsky MA, MacDonald JR, Interisano SA, Yarasheski KE. The time course for elevated muscle protein synthesis following heavy resistance exercise. *Can J Appl Physiol Rev Can Physiol Appl.* déc 1995;20(4):480-6.
142. Kerksick C, Harvey T, Stout J, Campbell B, Wilborn C, Kreider R, et al. International Society of Sports Nutrition position stand: nutrient timing. *J Int Soc Sports Nutr.* 3 oct 2008;5:17.
143. Hoffman JR, Ratamess NA, Tranchina CP, Rashti SL, Kang J, Faigenbaum AD. Effect of protein-supplement timing on strength, power, and body-composition changes in resistance-trained men. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* avr 2009;19(2):172-85.
144. Weinert DJ. Nutrition and muscle protein synthesis: a descriptive review. *J Can Chiropr Assoc.* août 2009;53(3):186-93.
145. Churchward-Venne TA, Breen L, Di Donato DM, Hector AJ, Mitchell CJ, Moore DR, et al. Leucine supplementation of a low-protein mixed macronutrient beverage enhances myofibrillar protein synthesis in young men: a double-blind, randomized trial. *Am J Clin Nutr.* févr 2014;99(2):276-86.
146. Règlement (UE) no 432/2012 de la Commission du 16 mai 2012 établissant une liste des allégations de santé autorisées portant sur les denrées alimentaires, autres que celles faisant référence à la réduction du risque de maladie ainsi qu'au développement et à la santé infantiles Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE. :40.
147. Chandler RM, Byrne HK, Patterson JG, Ivy JL. Dietary supplements affect the anabolic hormones after weight-training exercise. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. févr 1994;76(2):839-45.
148. Andersen LL, Tufekovic G, Zebis MK, Cramer RM, Verlaan G, Kjaer M, et al. The effect of resistance training combined with timed ingestion of protein on muscle fiber size and muscle strength. *Metabolism.* févr 2005;54(2):151-6.
149. Kerksick CM, Arent S, Schoenfeld BJ, Stout JR, Campbell B, Wilborn CD, et al. International society of sports nutrition position stand: nutrient timing. *J Int Soc Sports*

Nutr [Internet]. 29 août 2017 [cité 20 mai 2018];14. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5596471/>

150. Tang JE, Moore DR, Kujbida GW, Tarnopolsky MA, Phillips SM. Ingestion of whey hydrolysate, casein, or soy protein isolate: effects on mixed muscle protein synthesis at rest and following resistance exercise in young men. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. sept 2009;107(3):987-92.
151. Phillips SM. The science of muscle hypertrophy: making dietary protein count. *Proc Nutr Soc.* févr 2011;70(1):100-3.
152. Kukuljan S, Nowson CA, Sanders K, Daly RM. Effects of resistance exercise and fortified milk on skeletal muscle mass, muscle size, and functional performance in middle-aged and older men: an 18-mo randomized controlled trial. *J Appl Physiol.* 22 oct 2009;107(6):1864-73.
153. Reitelseder S, Agergaard J, Doessing S, Helmark IC, Schjerling P, van Hall G, et al. Positive muscle protein net balance and differential regulation of atrogene expression after resistance exercise and milk protein supplementation. *Eur J Nutr.* févr 2014;53(1):321-33.
154. Moriscot A, Baptista IL, Bogomolovas J, Krohne C, Hirner S, Granzier H, et al. MuRF1 is a muscle fiber type II associated factor and together with MuRF2 regulates type II fiber trophicity and maintenance. *J Struct Biol.* mai 2010;170(2):344-53.
155. Sandri M, Sandri C, Gilbert A, Skurk C, Calabria E, Picard A, et al. Foxo transcription factors induce the atrophy-related ubiquitin ligase atrogin-1 and cause skeletal muscle atrophy. *Cell.* 30 avr 2004;117(3):399-412.
156. Wray CJ, Mammen JM, Hershko DD, Hasselgren PO. Sepsis upregulates the gene expression of multiple ubiquitin ligases in skeletal muscle. *Int J Biochem Cell Biol.* mai 2003;35(5):698-705.
157. Churchley EG, Coffey VG, Pedersen DJ, Shield A, Carey KA, Cameron-Smith D, et al. Influence of preexercise muscle glycogen content on transcriptional activity of metabolic and myogenic genes in well-trained humans. *J Appl Physiol.* avr 2007;102(4):1604-11.
158. Louis E, Raue U, Yang Y, Jemiolo B, Trappe S. Time course of proteolytic, cytokine, and myostatin gene expression after acute exercise in human skeletal muscle. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. nov 2007;103(5):1744-51.
159. Informed-Sport | Global Sports Supplement Testing Programme [Internet]. [cité 7 juin 2018]. Disponible sur: <http://www.informed-sport.com/>



DEMANDE D'AUTORISATION DE SOUTENANCE

Nom et Prénom de l'étudiant : PAF Harold INE : 21003666

Date, heure et lieu de soutenance :

Le 05 / 10 / 2018 à 17 h 15 .. Amphithéâtre ou salle : ANPHI PAVING

Avis du conseiller (directeur) de thèse

Nom : HENNEBELLE Prénom : Thierry

Favorable

Défavorable

Motif de l'avis défavorable : /

Date : 18/09/2018

Signature: [Signature]

Avis du Président de Jury

Nom : HENNEBELLE Prénom : Thierry

Favorable

Défavorable

Motif de l'avis défavorable : /

Date : 18/09/2018

Signature: [Signature]

Décision de Monsieur le Doyen

Favorable

Défavorable

Le Doyen
[Signature]
D. DECAUDIN

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.

Université de Lille
FACULTE DE PHARMACIE DE LILLE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE
Année Universitaire 2017/2018

Nom : Pat
Prénom : Harold

Titre de la thèse : LES BESOINS PROTEIQUES DU SPORTIF DE FORCE ET SUPPLEMENTATION

Mots-clés : Protéines, besoins protéiques, sport, sportif de force, alimentation, lactosérum, soja, supplémentation, métabolisme protéique.

Résumé :

Contexte : Dans un monde moderne où l'activité physique prend une place importante ainsi que la consommation de compléments alimentaires, il était nécessaire de faire un point sur les besoins réels en protéines des sportifs ainsi que l'utilité d'utiliser des suppléments. Des études justifient l'utilisation de supplément protéique pour atteindre des besoins quantitatifs et qualitatifs jusqu'à un certain point.

Méthode : Il aura s'agit d'un travail de recherche bibliographique afin de faire un point sur les connaissances actuelles.

Résultats : Malgré des études de plus en plus nombreuses sur le domaine des protéines et de la supplémentation, de nombreuses variations coexistent entre les pays.

Membres du jury :

Président : HENNEBELLE Thierry, Professeur, Faculté de Pharmacie de Lille

Assesseur : ROUMY Vincent, Docteur et Enseignant, Faculté de Pharmacie De Lille

Membre extérieur : DESCAMPS Antoine, Pharmacien, Pharmacie LIEVENS