



HAL
open science

Nutrition et force athlétique : comprendre la physiologie de l'effort de force afin d'établir des stratégies nutritionnelles spécifiques

Julien Spindler

► To cite this version:

Julien Spindler. Nutrition et force athlétique : comprendre la physiologie de l'effort de force afin d'établir des stratégies nutritionnelles spécifiques. Sciences pharmaceutiques. 2017. hal-01931946

HAL Id: hal-01931946

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01931946v1>

Submitted on 23 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-thesesexercice-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

UNIVERSITE DE LORRAINE
2017

FACULTE DE PHARMACIE

THESE

Présentée et soutenue publiquement

Le 06 juillet 2017, sur un sujet dédié à :

**NUTRITION ET FORCE ATHLETIQUE :
COMPRENDRE LA PHYSIOLOGIE
DE L'EFFORT DE FORCE AFIN D'ETABLIR
DES STRATEGIES NUTRITIONNELLES
SPECIFIQUES**

pour obtenir

le Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie

par Julien SPINDLER

né le 16 novembre 1986 à Thionville (57)

Membres du Jury

Président :	Pr. Béatrice FAIVRE,	Professeur des Universités, Pharmacien, UL
Directeur de thèse :	Dr. Emilie VELOT,	Maître de Conférences, UL
Juges :	Dr. Natacha DREUMONT,	Maître de Conférences, UL
	Dr. Anne Sylvie HINZELIN,	Pharmacien

UNIVERSITÉ DE LORRAINE
FACULTÉ DE PHARMACIE
Année universitaire 2016-2017

DOYEN

Francine PAULUS

Vice-Doyen

Béatrice FAIVRE

Directeur des Etudes

Virginie PICHON

Conseil de la Pédagogie

Président, Brigitte LEININGER-MULLER

Collège d'Enseignement Pharmaceutique Hospitalier

Président, Béatrice DEMORE

Commission Prospective Facultaire

Président, Christophe GANTZER

Vice-Président, Jean-Louis MERLIN

Commission de la Recherche

Président, Raphaël DUVAL

Responsable de la filière Officine

Responsables de la filière Industrie

Responsable de la filière Hôpital

Responsable Pharma Plus ENSIC

Responsable Pharma Plus ENSAIA

Responsable Pharma Plus ENSGSI

Responsable de la Communication

**Responsable de la Cellule de Formation Continue
et individuelle**

**Responsable de la Commission d'agrément
des maîtres de stage**

Responsable ERASMUS

Béatrice FAIVRE

Isabelle LARTAUD,

Jean-Bernard REGNOUF de VAINS

Béatrice DEMORE

Jean-Bernard REGNOUF de VAINS

Raphaël DUVAL

Igor CLAROT

Marie-Paule SAUDER

Béatrice FAIVRE

Béatrice FAIVRE

Mihayl VARBANOV

DOYENS HONORAIRES

Chantal FINANCE

Claude VIGNERON

PROFESSEURS EMERITES

Jeffrey ATKINSON

Jean-Claude BLOCK

Max HENRY

Alain MARSURA

Claude VIGNERON

PROFESSEURS HONORAIRES

Pierre DIXNEUF

Marie-Madeleine GALTEAU

Thérèse GIRARD

Michel JACQUE

Pierre LABRUDE

Vincent LOPPINET

Janine SCHWARTZBROD

Louis SCHWARTZBROD

MAITRES DE CONFERENCES HONORAIRES

Monique ALBERT

Mariette BEAUD

Gérald CATAU

Jean-Claude CHEVIN

Jocelyne COLLOMB

Bernard DANGIEN

Marie-Claude FUZELLIER

Françoise HINZELIN

ASSISTANTS HONORAIRES

Marie-Catherine BERTHE
Annie PAVIS

Marie-Hélène LIVERTOUX
Bernard MIGNOT
Jean-Louis MONAL
Blandine MOREAU
Dominique NOTTER
Christine PERDICAKIS
Marie-France POCHON
Anne ROVEL
Gabriel TROCKLE
Maria WELLMAN-ROUSSEAU
Colette ZINUTTI

ENSEIGNANTS

Section CNU*

Discipline d'enseignement

PROFESSEURS DES UNIVERSITES - PRATICIENS HOSPITALIERS

Danièle BENSOUSSAN-LEJZEROWICZ	82	Thérapie cellulaire
Jean-Louis MERLIN	82	Biologie cellulaire
Alain NICOLAS	80	Chimie analytique et Bromatologie
Jean-Michel SIMON	81	Economie de la santé, Législation pharmaceutique
Nathalie THILLY	81	Santé publique et Epidémiologie

PROFESSEURS DES UNIVERSITES

Christine CAPDEVILLE-ATKINSON	86	Pharmacologie
Igor CLAROT	85	Chimie analytique
Joël DUCOURNEAU	85	Biophysique, Acoustique, Audioprothèse
Raphaël DUVAL	87	Microbiologie clinique
Béatrice FAIVRE	87	Biologie cellulaire, Hématologie
Luc FERRARI	86	Toxicologie
Pascale FRIANT-MICHEL	85	Mathématiques, Physique
Christophe GANTZER	87	Microbiologie
Frédéric JORAND	87	Eau, Santé, Environnement
Isabelle LARTAUD	86	Pharmacologie
Dominique LAURAIN-MATTAR	86	Pharmacognosie
Brigitte LEININGER-MULLER	87	Biochimie
Pierre LEROY	85	Chimie physique
Philippe MAINCENT	85	Pharmacie galénique
Patrick MENU	86	Physiologie
Jean-Bernard REGNOUF de VAINS	86	Chimie thérapeutique
Bertrand RIHN	87	Biochimie, Biologie moléculaire

MAITRES DE CONFÉRENCES DES UNIVERSITÉS - PRATICIENS HOSPITALIERS

Béatrice DEMORE	81	Pharmacie clinique
Alexandre HARLE	82	Biologie cellulaire oncologique
Julien PERRIN	82	Hématologie biologique
Marie SOCHA	81	Pharmacie clinique, thérapeutique et biotechnique

MAITRES DE CONFÉRENCES

Sandrine BANAS	87	Parasitologie
Xavier BELLANGER	87	Parasitologie, Mycologie médicale
Emmanuelle BENOIT	86	Communication et Santé
Isabelle BERTRAND	87	Microbiologie
Michel BOISBRUN	86	Chimie thérapeutique
François BONNEAUX	86	Chimie thérapeutique

Ariane BOUDIER	85	Chimie Physique
Cédric BOURA	86	Physiologie
Joël COULON	87	Biochimie
Sébastien DADE	85	Bio-informatique
Dominique DECOLIN	85	Chimie analytique
Roudayna DIAB	85	Pharmacie galénique
Natacha DREUMONT	87	Biochimie générale, Biochimie clinique
Florence DUMARCAY	86	Chimie thérapeutique
François DUPUIS	86	Pharmacologie
Adil FAIZ	85	Biophysique, Acoustique
Anthony GANDIN	87	Mycologie, Botanique
Caroline GAUCHER	86	Chimie physique, Pharmacologie
Stéphane GIBAUD	86	Pharmacie clinique
Thierry HUMBERT	86	Chimie organique
Olivier JOUBERT	86	Toxicologie, Sécurité sanitaire

ENSEIGNANTS (suite)

Section CNU* Discipline d'enseignement

Alexandrine LAMBERT	85	Informatique, Biostatistiques
Julie LEONHARD	86/01	Droit en Santé
Christophe MERLIN	87	Microbiologie environnementale
Maxime MOURER	86	Chimie organique
Coumba NDIAYE	86	Epidémiologie et Santé publique
Marianne PARENT	85	Pharmacie galénique
Francine PAULUS	85	Informatique
Caroline PERRIN-SARRADO	86	Pharmacologie
Virginie PICHON	85	Biophysique
Sophie PINEL	85	Informatique en Santé (e-santé)
Anne SAPIN-MINET	85	Pharmacie galénique
Marie-Paule SAUDER	87	Mycologie, Botanique
Guillaume SAUTREY	85	Chimie analytique
Rosella SPINA	86	Pharmacognosie
Sabrina TOUCHET	86	Pharmacochimie
Mihayl VARBANOV	87	Immuno-Virologie
Marie-Noëlle VAULTIER	87	Mycologie, Botanique
Emilie VELOT	86	Physiologie-Physiopathologie humaines
Mohamed ZAIYOU	87	Biochimie et Biologie moléculaire

PROFESSEUR ASSOCIE

Anne MAHEUT-BOSSER	86	Sémiologie
--------------------	----	------------

PROFESSEUR AGREGÉ

Christophe COCHAUD	11	Anglais
--------------------	----	---------

⌘ En attente de nomination

***Disciplines du Conseil National des Universités :**

80 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé

81 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences du médicament et des autres produits de santé

82 : Personnels enseignants et hospitaliers de pharmacie en sciences biologiques, fondamentales et cliniques

85 ; Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences physico-chimiques et ingénierie appliquée à la santé

86 : Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences du médicament et des autres produits de santé

87 : Personnels enseignants-chercheurs de pharmacie en sciences biologiques, fondamentales et cliniques

11 : Professeur agrégé de lettres et sciences humaines en langues et littératures anglaises et anglo-saxonnes

SERMENT DES APOTHICAIRES



Jé jure, en présence des maîtres de la Faculté, des conseillers de l'ordre des pharmaciens et de mes condisciples :

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

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

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine ; en aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels.

Que les hommes m'accordent leur estime si je suis fidèle à mes promesses.

Que je sois couvert d'opprobre et méprisé de mes confrères si j'y manque.



« LA FACULTE N'ENTEND DONNER AUCUNE
APPROBATION, NI IMPROBATION AUX OPINIONS
EMISES DANS LES THESES, CES OPINIONS DOIVENT
ETRE CONSIDEREES COMME PROPRES A LEUR
AUTEUR ».

Remerciements

A ma directrice de thèse,

le **Docteur Emilie Velot,**

je tiens à vous remercier d'avoir accepté de diriger cette thèse. Merci pour vos conseils, votre sympathie et la disponibilité dont vous avez fait preuve à mon égard. Je vous remercie également du temps et de l'attention que vous avez accordés à relire et à corriger ce travail. Je vous prie d'accepter mes sincères remerciements.

A ma présidente de jury,

le **Professeur Béatrice Faivre**, Vice-Doyen de la Faculté de Pharmacie de Nancy

je souhaite vous remercier de m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence de ma thèse. Veuillez trouver ici le témoignage de ma profonde estime et de ma plus vive reconnaissance.

A mes juges,

le **Docteur Natacha Dreumont,**

tous mes remerciements pour avoir accepté de juger ce travail, veuillez trouver ici l'expression de ma gratitude.

et le **Docteur Anne-Sylvie Hinzelin,**

votre présence au sein de ce jury est un honneur. Veuillez recevoir mes sincères remerciements.

A mes parents Charles et Christiane,

Sans qui rien n'aurait été possible. Merci pour l'amour, le soutien, l'écoute et l'aide que vous m'avez apportés. Merci pour les valeurs que vous m'avez inculquées et pour les sacrifices que vous avez faits afin de m'offrir l'opportunité d'étudier dans les conditions les plus sereines qui soient. Voyez en ce travail le témoignage de toute ma gratitude.

A ma Sœur Jeanne et son compagnon Tony,

Jeanne merci pour le soutien et la joie de vivre que tu m'apportes depuis tant d'années. Merci d'être là, je t'aime petite sœur! Tony merci pour l'aide que tu m'apportes, pour les passions qui t'animes et que tu as plaisir à partager.

A mes grands-parents,

Méms et Péps. Merci pour vos encouragements et tous les souvenirs joyeux que j'ai avec vous depuis mon enfance.

Oma et Opa. Ne pas vous avoir connu m'attriste énormément, une pensée émue pour vous qui n'êtes plus là.

A mes oncles, tantes, cousins et cousines,

Merci pour tous les bons moments partagés ensemble, je suis heureux de vous avoir.

A Max que je considère comme mon frère. A Jordan avec qui j'ai partagé tant de bons moments. A Xa qui ne refuse jamais de donner de son temps pour aider.

A mes amis,

Michael, Guillaume, Julien ainsi que tous ceux qui devraient également être cités et qui se reconnaîtront. Quelques lignes ne peuvent suffire pour résumer tout les souvenirs qui nous lient. Je veux simplement vous remercier pour tout ce que vous m'avez apporté au cours de ces années.

Aux pharmaciens titulaires et aux équipes officinales que j'ai côtoyés,

Au défunt M. Davério et à l'équipe de la pharmacie de Metzervisse, à M. Hamelin et M. Schwartzmann ainsi qu'à l'équipe de la pharmacie de la Libération, à M. Cleyet-Merle et son équipe: merci de m'avoir accueilli durant mon cursus universitaire et d'avoir contribué à faire de moi le pharmacien que je suis aujourd'hui.

Enfin merci au Docteur Pierre Mangin et à toutes mes collègues de la pharmacie du parc de me supporter au quotidien et de me permettre de m'épanouir dans mon travail.

Sommaire

TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	3
LISTE DES ABREVIATIONS.....	5
INTRODUCTION ET OBJECTIFS DU TRAVAIL	9
1. PRESENTATION DE LA FORCE ATHLETIQUE.....	11
A. Généralités	12
B. Rappel historique.....	12
C. Organisation de la discipline : les institutions	14
D. Description et spécificités de la force athlétique.....	15
1. Les épreuves constituant la force athlétique.....	15
2. Force athlétique et réglementation	23
3. Déroulement d'une compétition.....	25
E. Quelques chiffres.....	27
1. Nombre de licenciés en France.....	27
2. Les différents records.....	27
F. Amalgames et idées reçues.....	29
G. Conclusion.....	30
2. L'ENTRAÎNEMENT EN FORCE ATHLETIQUE ET LES ADAPTATIONS INDUITES	32
A. Entraînement et récupération.....	33
1. Entraînement.....	34
2. Récupération, surcompensation et adaptations.....	36
3. Homéostasie et adaptations	38
B. L'entraînement en force athlétique et sa périodisation	40
1. Les bases de l'entraînement de la force athlétique.....	41
2. La périodisation : planifier son cycle de progression.....	47
C. Amélioration de la force : les adaptations induites	48
1. Adaptations structurales	48
2. Adaptations fonctionnelles nerveuses et neuromusculaires.....	52

3. ATTEINDRE SES OBJECTIFS EN S'APPUYANT SUR L'ALIMENTATION	53
A. Estimer ses besoins nutritionnels, définir ses apports	55
B. Les macronutriments pour la pratique de la force athlétique	55
1. Les protéines et l'athlète de force athlétique.....	56
2. Les lipides : un macronutriment indispensable	78
3. Les glucides	87
C. Fibres et micronutriments au service du sportif	95
1. Les fibres au service du système digestif	96
2. Les principaux micronutriments au service du sportif de force.....	98
D. Objectifs du sportif et réalisation d'un plan alimentaire.....	113
1. La couverture énergétique et l'optimisation de la composition corporelle	113
2. Répartition des apports	115
4. CONCLUSION	117
BIBLIOGRAPHIE.....	119

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LES FIGURES

Figure 1. Photographie d'athlètes lors de l'évènement <i>The Powerlifting Tournament of America</i> [GRIGONIS, 2012].....	13
Figure 2. Photographie de Mikhail Andrukhin réalisant un soulevé de terre lors du <i>Men's European Powerlifting Championships</i> de 2002 [KOBERRICH, 2002a]	16
Figure 3. Photographie montrant l'exécution d'un soulevé de terre en prise conventionnelle [ARDISON, 2014]	17
Figure 4. Représentation des principaux muscles sollicités lors des mouvements de FA (vue de face et vue de dos) [DELAVIER ET GUNDILL, 2010]	18
Figure 5. Photographie de Zhanna Ivanova réalisant une flexion de jambe lors de l' <i>European Junior Powerlifting Championships</i> de 2002 [KOBERRICH, 2002b].....	18
Figure 6. Illustration des étapes d'un <i>squat</i> durant sa phase excentrique [YLITALO-JAMES, 2012]	21
Figure 7. Photographie d'Ivan Freydun réalisant un développé couché lors de l' <i>European Junior Powerlifting Championships</i> de 2003 [KOBERRICH, 2003].....	22
Figure 8. Les étapes d'un développé couché : du placement à l'exécution du mouvement [NARVAEZ, 2014]	23
Figure 9. Principe de progression par surcompensations successives [LEON, 2016].....	37
Figure 10. Effets induits par l'intensité de travail [MAITRE, 2013].....	44
Figure 11. ANC en vitamines et minéraux chez l'adulte et réévaluation chez le sportif [AFSSA, 2000]	99
Figure 12. Métabolisme de la vitamine D [SOUBERBIELLE, 2011]	104

LES TABLEAUX

Tableau I. Catégories d'âge en vigueur au sein de l'IPF et de la FFForce [FFForce, 2016] [IPF, 2016a].....	23
Tableau II. Catégories de poids en vigueur au sein de l'IPF et de la FFForce [IPF, 2016a] ..	24
Tableau III. Evolution du nombre de licencié au sein de la FFHMFAC de 2001 à 2014 [FFHMFAC, 2014]	27
Tableau IV. Records masculins (en kg) réalisés en IPF dans 3 catégories de poids différentes en Open équipé [STETSENKO, 2016]	28
Tableau V. Records masculins (en kg) réalisés en IPF dans 3 catégories de poids différentes en Open <i>raw</i> [STETSENKO, 2016]	28
Tableau VI. Records féminins (en kg) réalisés en IPF dans 3 catégories de poids différentes en Open équipé [STETSENKO, 2016].....	28
Tableau VII. Records féminins (en kg) réalisés en IPF dans 3 catégories de poids différentes en Open <i>raw</i> [STETSENKO, 2016]	28
Tableau VIII. Estimations des besoins en AA indispensables chez l'adulte définis par différentes institutions [AFSSA, 2007]	61
Tableau IX. Profils des protéines de certains aliments [FAO, 1991] [WHO, 2007]	64
Tableau X. Classification des glucides suivant leur DP et leur digestibilité [CEDUS, 2012] ..	88

LISTE DES ABREVIATIONS

AA : acide aminé

AAU : *American Athletic Union*

ADN : acide désoxyribonucléique

ADP : adénosine diphosphate

AETQ : apport énergétique total quotidien

Afssa : Agence française de sécurité sanitaire des aliments

AG : acide gras

AGMI : acide gras mono-insaturé

AGPI : acide gras poly-insaturé

AGS : acide gras saturé

AGT : acide gras trans

AL : acide linoléique

ALA : acide α -linoléique

ANC : apport nutritionnel conseillé

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

ARN : acide ribonucléique

ATP : adénosine triphosphate

BCAA : *branched-chain amino acid*

CEP : coefficient d'efficacité protéique

CG : charge glycémique

CIO : Comité International Olympique

CLA : *conjugated linoleic acid*

CO₂ : dioxyde de carbone

CUD : coefficient d'utilisation digestive

DEJ : dépense énergétique journalière

DHA : acide docosahexaénoïque

DIAAS : *digestible indispensable amino acid score*

DP : degré de polymérisation

DRI : *Dietary Reference Intakes*

DS : disaccharide

EPA : acide eicosapentaénoïque

EPIC : *European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition*

FA : force athlétique

FAO : *Food and Agriculture Organization of the United Nations*

FFFA : Fédération Française de Force Athlétique

FFForce : Fédération Française de Force

FFHMFAC : Fédération Française d'Haltérophilie, de Musculation, de Force Athlétique et de Culturisme

FGF : *fibroblast growth factor*

FNB : *Food and Nutrition Bulletin*

FOS : fructo-oligosaccharide

FSFA : Fédération Sportive de Force Athlétique

FSR : *fractional synthetic rate*

GH : *growth hormone*

GPx : glutathion peroxydase

GSH : glutathion sous forme réduite

GSSG : glutathion sous forme oxydée

HAS : Haute autorité de santé

HDL : *high density lipoprotein*

IC : indice chimique

IG : index glycémique

IGF : *insulin-like growth factor*

II : index insulinémique

IOM : *Institute Of Medicine*

IPF : *International Powerlifting Federation*

IRM : imagerie par résonance magnétique

IWF : *International Weightlifting Federation*

kCal : kilocalorie

LDL : *low density lipoprotein*

MB : métabolisme de base

MS : monosaccharide

NADP : nicotinamide adénine dinucléotide phosphate

NAP : niveau d'activité physique

NPU : *Net Protein Utilization*

OMS : Organisation mondiale de la santé

OS : oligosaccharide

PCB : polychlorobiphényle

PD-CAAS : *protein digestibility-corrected amino acid score*

PRAL : *potential renal acid load*

PS : polysaccharide

PTH : parathormone

RL : radicaux libres

RM : répétition maximale

ROS : *reactive oxygen species*

RXR : *retinoid X receptor*

SOD : superoxyde dismutase

SU.VI.MAX : Supplémentation en vitamines et minéraux anti-oxydants

TG : triglycéride

UI : unité internationale

UM : unité motrice

UNU : United Nations University

UPN : utilisation protéique nette

UV : ultraviolet

VB : valeur biologique

VDR : *vitamin D receptor*

VLDL : *very low density lipoprotein*

WDFPF : *World Drug-Free Powerlifting Federation*

WPC : *World Powerlifting Congress*

WHO : *World Health Organization*

INTRODUCTION ET OBJECTIFS DU TRAVAIL

La force athlétique (FA) est un sport demandant de grandes qualités physiques et mentales. C'est une discipline très exigeante et éprouvante car le stress engendré sur l'organisme des pratiquants est important. Par l'analyse de ce sport et sa mise en exergue, mes objectifs sont de comprendre les conséquences physiologiques de sa pratique sur le corps humain. Après des rappels en nutrition, je donnerai mon avis sur l'alimentation à mettre en place pour optimiser le gain de force et les performances du sportif pratiquant la force athlétique. Mon manuscrit est organisé de la manière suivante.

Dans un premier temps, il sera nécessaire de définir ce sport. Je vais en résumer les principes, détailler les mouvements qui le composent, définir quelques points importants de son règlement et illustrer sa pratique avec des données chiffrées. Ce préambule servira à délimiter le contexte dans lequel le sportif pratiquant la FA évolue.

Dans un deuxième temps, je vais chercher à comprendre les phénomènes liés à l'effort de force, savoir comment le sportif s'améliore et quels sont les adaptations physiologiques et métaboliques qui en résultent. L'entraînement et la récupération seront les facteurs principaux qui conditionneront de manière prépondérante la progression de l'athlète. Ainsi, adopter une stratégie d'entraînement avec de bonnes conditions de récupération servira de base pour optimiser les gains de force. Toutefois, pour permettre et accompagner l'ensemble des phénomènes d'adaptation qui vont en découler, l'athlète devra s'appuyer sur une alimentation de qualité, en quantité, spécifique à ses besoins et à ses objectifs. C'est pourquoi, à travers l'explication des phénomènes liés à l'entraînement de la force et de ses effets induits, je serai plus à même, dans la partie suivante, de juger et de comprendre la spécificité des besoins nutritionnels de l'athlète de force.

Dans un troisième temps, mon travail se focalisera sur la prise en charge nutritionnelle de l'athlète de force. Le but de cette étude sera de définir l'alimentation à mettre en place pour permettre au sportif d'atteindre ses différents objectifs et exprimer son plein potentiel. L'alimentation joue un rôle primordial dans notre santé au quotidien. Il en va de même chez le sportif, à ceci près que son plan nutritionnel va moduler ses performances en compétition, son ressenti lors de ses entraînements, sa force et ses capacités de récupération. Il faudra garder à l'esprit que l'alimentation quotidienne du sportif de force devra respecter les règles de l'alimentation pour tous. Ainsi, elle devra reposer sur des fondements essentiels comme la diversité alimentaire, les goûts et préférences de l'athlète tout en prenant en compte les

éventuelles intolérances et allergies alimentaires. Dans un premier temps il sera nécessaire de définir les besoins énergétiques du sportif. Puis il faudra déterminer comment structurer cet apport. La pratique de la FA place l'organisme dans un contexte nutritionnel spécifique. Les macronutriments, que sont les protéines, les glucides et les lipides, vont donc devoir être apportés dans des quantités adaptées afin de placer l'organisme dans les meilleures conditions. Pour chaque macronutriment, un rappel des différentes classes d'aliments sera fait. Cette présentation sera d'autant plus importante qu'elle permettra à l'athlète de mettre en corrélation les données théoriques correspondantes à ses besoins avec des choix alimentaires concrets. Je m'intéresserai ensuite aux fibres, à quelques micronutriments comme le magnésium, la vitamine D et certains anti-oxydants essentiels chez ce type de sportif. Pour finir je détaillerai quelques stratégies nutritionnelles pouvant être utiles afin de répondre aux différents objectifs « poids » des athlètes.

1. PRESENTATION DE LA FORCE ATHLETIQUE

A. Généralités

La FA est un sport classé dans la catégorie des disciplines à dominance de force. C'est une activité dite acyclique car chaque action nécessite un mouvement différent. En effet, elle est composée de trois mouvements spécifiques qui représentent les épreuves de ce sport. Il s'agit de la flexion de jambes ou *squat* en anglais, du développé couché ou *bench-press* et du soulevé de terre ou *deadlift*. L'athlète va avoir pour objectif de soulever la charge la plus lourde possible par l'intermédiaire des mouvements cités ci-dessus, et ce, sur une répétition. Lors d'une compétition, le sportif réalise trois essais pour chaque épreuve. Le classement est obtenu grâce aux scores totaux représentant la somme des meilleurs essais pour chaque mouvement. Une explication plus détaillée sera donnée par la suite [IPF, 2016a] [IWGA, 2016].

C'est un sport relativement proche de l'haltérophilie et qui est originaire des Etats-Unis d'Amérique. Il est appelé *powerlifting* dans les pays anglo-saxons, c'est d'ailleurs son nom officiel et dynamophilie au Québec. Son apparition est récente, en effet les premières compétitions officielles et l'encadrement professionnel datent du début des années 1970. Sous sa forme actuelle, ce sport a donc une trentaine d'années d'existence. La FA n'est pas une discipline olympique (contrairement à l'haltérophilie) chez les athlètes valides mais il est à noter qu'elle fait partie du programme officiel des Jeux Paralympiques (la discipline est une version handisport du développé couché) [GRIGONIS, 2012] [IPC POWERLIFTING, 2016].

B. Rappel historique

La FA est un sport d'origine récente fondée aux Etats-Unis d'Amérique. Les mouvements qui la constituent ont été développés, popularisés et standardisés au cours du XX^{ème} siècle. Pourquoi n'ont-ils pas été inventés avant ? Tout simplement car le matériel adéquat n'existait pas avant la fin du XIX^{ème} siècle [TODD, 1995].

Avant le XX^{ème} siècle, de nombreuses épreuves de forces cohabitaient. Ces épreuves rassemblaient des mouvements divers et variés. Aux Etats-Unis d'Amérique, deux fédérations spécialisées avaient pour tâches de les encadrer et d'homologuer les records (de manière non compétitive). A partir de 1905, le comité international olympique (CIO) suggéra de structurer de manière claire les sports dits « de force ». La Fédération Internationale d'Haltérophilie ou *International Weightlifting Federation (IWF)* fut créée en 1920 puis évolua vers sa forme actuelle. Tous les exercices pratiqués ne pouvant être maintenus, l'haltérophilie s'est construite sur la base de trois mouvements. C'est sous cette forme qu'elle fut pratiquée lors des Jeux Olympiques de 1928 (aujourd'hui seuls deux mouvements

perdurent). Quant aux autres mouvements, ils furent regroupés dans un sport nommé *odd lifts*. Une première compétition rassemblant certains mouvements de force eut lieu en septembre 1964 à York en Pennsylvanie (Figure 1). Cette dernière, non officielle, est connue sous le nom de *The Powerlifting Tournament of America*. Les athlètes concouraient sur 4 disciplines : le développé couché, la flexion de jambes, le soulevé de terre et le *curl* biceps. Ce dernier fut retiré par la suite. Ce fut grâce à l'introduction et la standardisation des trois mouvements comme épreuves que la FA est apparue dans les années 1960 [GRIGONIS, 2012] [SUTPHIN, 2014] [WARPEHA, 2015].

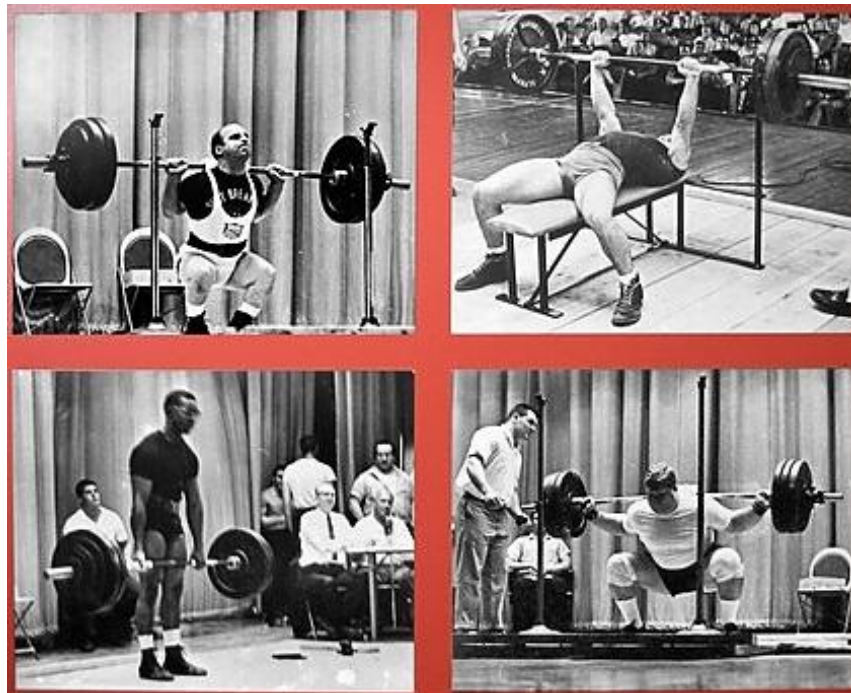


Figure 1. Photographie d'athlètes lors de l'évènement *The Powerlifting Tournament of America* [GRIGONIS, 2012]

Suite à cette rencontre, une organisation rassemblant plusieurs sports amateurs, l'*American Athletic Union* (AAU), accepta la FA dans son programme. Le 6 novembre 1971, les Etats-Unis d'Amérique organisèrent à York le premier championnat du monde. Puis le 11 novembre 1972, l'*International Powerlifting Federation* (IPF) fut créée. Cette entité est la première fédération internationale réellement centrée sur la FA et son apparition a permis d'encadrer sa pratique de manière cohérente. A partir de cette première instance, des fédérations nationales et continentales vont naître, s'affilier et se structurer, permettant ainsi l'ouverture et l'encadrement de cette pratique sportive au sein de clubs. Une réglementation précise va être rédigée, permettant l'organisation des premières compétitions aboutissant à des championnats nationaux, puis mondiaux. Il est à noter que l'introduction de

championnats féminins a eu lieu très tôt, dès 1980 [SUTPHIN, 2014] [TODD, 2004] [UNITT, 2008] [WARPEHA, 2015].

En France, c'est en 1982 qu'est apparue la Fédération Française de Force Athlétique (FFFA) qui s'affilia ensuite à l'IPF [HATOT, 2015a]. Marc Vouillot a contribué à son essor et a tenté de la professionnaliser. Ce compétiteur, double champion de France en 1981 et 1982 (en moins de 110 kg), a surtout acquis sa réputation par son rôle d'entraîneur au sein du club de Viry-Châtillon. De nombreux athlètes français reconnaissent aussi l'influence de Jean Texier, à la fois culturiste et écrivain, il fut un des premiers en France à poser des bases solides sur la culture physique. Ses ouvrages écrits durant les années 1970-1980 comme « Visa pour le bodybuilding » (1987) ou « Visa pour le muscle : l'art du bodybuilding » (1981) sont d'ailleurs toujours des références pour les pratiquants de musculation.

C. Organisation de la discipline : les institutions

Actuellement, il existe plusieurs fédérations internationales ayant toutes une approche et une politique différente quant à la pratique de la FA. Ce morcellement de la discipline trouve son origine dans les années 1980. Des divisions au sein des instances et des divergences d'opinion sur des sujets comme le dopage, l'utilisation des équipements ou les droits télévisuels, ont abouti à cette séparation. La conséquence première résultant de cette diversité d'organismes est l'existence de plusieurs championnats suivant des réglementations distinctes. Cette multi-représentativité entraîne des disparités de résultats d'une fédération à l'autre [TODD, 2004] [WARPEHA, 2015].

Au niveau international, l'IPF, citée précédemment, est la structure historique la plus importante. Elle est présente dans plus de cent pays et est responsable de la présence et de l'organisation de la FA lors des Jeux Mondiaux (compétition rassemblant différents sports non présents aux Jeux Olympiques) [IWGA, 2016] [KELLER, 2015]. Cette fédération prône la technicité des mouvements réalisés et encadre très fortement ses compétitions (lutte antidopage, spécificité des équipements autorisés...). Une autre instance est la *World Powerlifting Congress* (WPC), où il n'y a pas de contrôle antidopage. L'accent est mis sur la recherche de record, sur le côté spectaculaire (le panel d'équipements autorisé est plus large qu'à l'IPF). Pour terminer, il y a la *World Drug-Free Powerlifting Federation* (WDFPF) qui a pour priorité la lutte contre le dopage. Cette volonté d'avoir un sport propre se retrouve lors de chaque compétition où 10% des athlètes se font contrôler [TODD, 2004].

En France, plusieurs fédérations coexistent, toutes sous tutelle d'instances internationales différentes. Il y a la Fédération Française de Force (FFForce) affiliée à l'IPF

qui est d'apparition récente (2015) [HATOT, 2015b] [KELLER, 2015]. Elle est issue de la scission de la Fédération française d'haltérophilie, musculation, force athlétique et culturisme (FFHMFAC) suite à la décision de l'IWF de séparer l'haltérophilie des autres sports de force non olympiques. Il existe également une branche française de la WPC - la WPC France - et la Fédération sportive de force athlétique ou FSFA (créée le 4 mars 2003) affiliée à la WDFPF.

D. Description et spécificités de la force athlétique

Dans cette partie, seront abordés les principes de la FA : épreuves, règles et codes spécifiques. Cependant, l'organisation de la pratique varie car il existe différentes fédérations, toutes avec un règlement distinct. Ici seront décrites uniquement les directives de l'IPF et de sa filière française, la FFForce.

1. Les épreuves constituant la force athlétique

Ce sport est constitué de trois épreuves, la flexion de jambes, le développé couché et le soulevé de terre. Chaque épreuve a une histoire et des techniques d'exécution spécifiques. Les groupes musculaires impliqués et les dangers éventuels sont là aussi propres à chaque mouvement. Ces trois exercices peuvent être qualifiés de mouvements de base de la musculation. Ils sont si complets (car poly-articulaires et de ce fait, faisant intervenir beaucoup de groupes musculaires) que cela en fait des exercices adéquats lors de la préparation physique d'athlètes dans de nombreux sports.

Il est à noter que la durée d'exécution pour chaque mouvement n'excède pas 10 secondes. Les individus ayant des problèmes cardiaques et vasculaires et/ou présentant des pathologies ou des faiblesses articulaires, osseuses, musculaires ne doivent surtout pas pratiquer ces exercices à charges maximales.

a. Le soulevé de terre ou deadlift

Histoire

Parmi les trois mouvements, le soulevé de terre (Figure 2) est probablement le plus ancien car nécessitant le matériel le moins sophistiqué. Les prémices de cette épreuve existaient avant l'ère moderne mais c'est au début du XX^{ème} siècle qu'un homme fort d'origine allemande, Hermann Görner dit « the mighty », l'a fait sortir de l'ombre. Lors de spectacles, il pouvait soulever des charges impressionnantes grâce à ce mouvement et à ses variantes. Il est ainsi rentré au *Guinness book* des records pour avoir réalisé un « *deadlift one handed* » à 301 kg à Leipzig en 1920 [GWR, 2016] [WARPEHA, 2015]. Par la

suite, la pratique de ce mouvement gagna en popularité dans le monde des sports de force, sous l'impulsion de nombreux athlètes. Des compétiteurs comme Ben Coat, Dan Austin ou plus récemment Eddie Hall peuvent être cités pour leur performances spectaculaires [SUTPHIN, 2014].

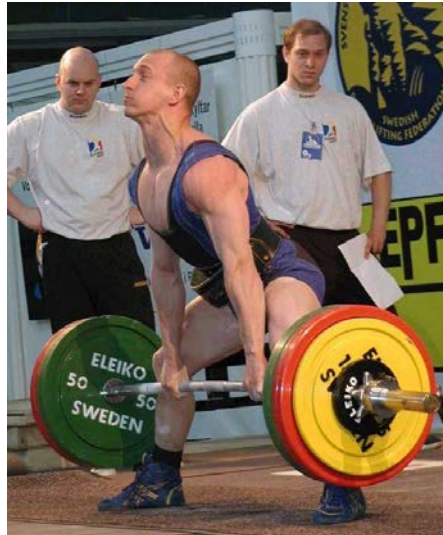


Figure 2. Photographie de Mikhail Andrukhin réalisant un soulevé de terre lors du Men's European Powerlifting Championships de 2002 [KOBERRICH, 2002a]

Technique

L'objectif de ce mouvement consiste, pour l'athlète, à soulever une barre positionnée au sol devant lui. C'est une technique d'extension du corps qui permet un tirage du poids du bas vers le haut (Figures 2 et 3). D'une manière classique, le concurrent se place de façon à ce que la barre se trouve au dessus du milieu des pieds puis il se penche (flexion des hanches avec le bassin en antéversion) et attrape la barre devant lui avec un écartement des mains égale à la largeur des épaules. Il fléchit ensuite les genoux jusqu'à ce que ses tibias touchent la barre. Pour finir il place correctement son dos en ressortant sa poitrine et ses fesses afin d'avoir le dos le plus droit possible. La technique d'exécution et la mise en position peuvent toutefois différer d'un concurrent à l'autre. Cette diversité d'approche dans la réalisation d'un soulevé de terre est expliquée par le profil morphologique unique de l'individu et de ses forces et faiblesses. Dans le respect des consignes, chacun peut adapter différents paramètres de positionnement comme l'écartement des mains sur la barre ainsi que la prise (pronation/supination), l'écartement des pieds au sol, le placement de son dos et la position des hanches au départ. Si les pieds sont éloignés d'une distance correspondante à la largeur du bassin, la prise est dite conventionnelle. Si l'écart est plus large, la prise est dite *sumo*. Ce simple changement influence le recrutement des différents groupes musculaires et leurs implications dans la réalisation du mouvement. Concrètement, la prise

sumo diminue l'amplitude du mouvement mais oblige l'athlète à développer plus de force au niveau de ses cuisses.

Une fois la position de départ acquise et avant de commencer l'effort, l'athlète doit effectuer deux actions permettant de rigidifier et de stabiliser sa position. Simultanément, il inspire et bloque sa respiration augmentant sa pression intra-abdominale et contracte l'ensemble de ses muscles abdominaux (transverse compris) tout en gainant ses lombaires. La partie haute du corps forme ainsi un bloc qui soutient le travail des membres sollicités. Le fait de contracter les abdominaux a aussi pour but de protéger les vertèbres en diminuant les forces de compression qui s'exercent sur elles lors de l'épreuve. C'est une technique qui s'apparente à la manœuvre de Valsalva [DELAMARE J, DELAMARE-RICHE V, *et al.*, 2004].

La position de départ étant verrouillée, l'athlète va effectuer son effort en réalisant d'abord une extension des genoux puis des hanches. La technique pour y arriver se doit d'être stricte. Il doit pousser au sol en utilisant la force de ses jambes (cette poussée se fait par les talons et le milieu des pieds), quand la barre atteint les genoux il engage le bassin, tire avec le dos en contractant également fortement les fessiers. Pendant cette phase de poussée et de redressement pendant laquelle le bassin part en rétroversion, la barre doit rester le plus proche possible des tibias. Le mouvement est validé et ne se termine que lorsque le compétiteur est en position debout avec les genoux verrouillés [DELAVIER, 2010] [DELAVIER ET GUNDILL, 2010].



Figure 3. Photographie montrant l'exécution d'un soulevé de terre en prise conventionnelle [ARDISON, 2014]

Informations diverses

Ce mouvement est un pilier pour les pratiquants de musculation car il fait intervenir de nombreux groupes musculaires et notamment ceux de la chaîne postérieure : ischio-jambiers (comme le biceps fémoral et le semi-tendineux), muscles glutéaux (grand et moyen fessiers), lombaires, trapèzes (faisceaux moyens et inférieurs), grand rond, grand dorsal,

quadriceps, adducteurs, mollets, avant-bras, trapèzes (faisceaux supérieurs), triceps (longue portion), épaules (faisceau postérieur), muscles érecteurs du rachis (Figure 4).

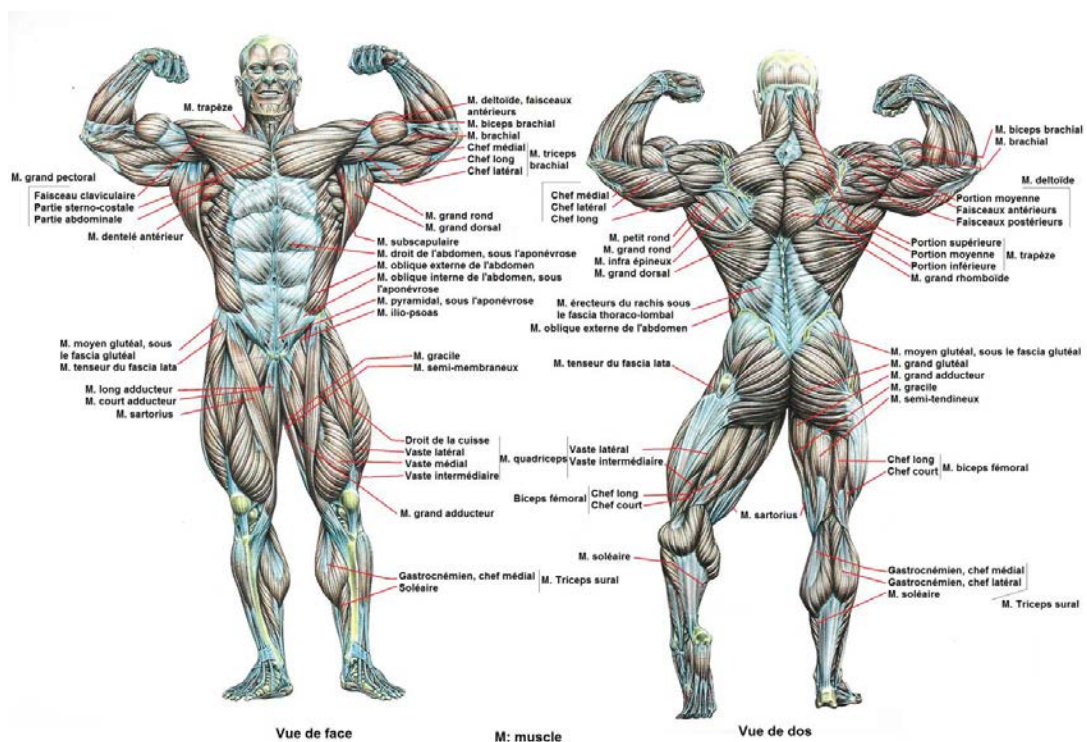


Figure 4. Représentation des principaux muscles sollicités lors des mouvements de FA (vue de face et vue de dos) [DELAVIER ET GUNDILL, 2010]

Il doit être réalisé avec une technique irréprochable car une mauvaise exécution du mouvement (par exemple le fait d'arrondir le dos pendant l'effort) peut entraîner de graves conséquences. Une discopathie peut apparaître du fait d'une pression trop importante au niveau des disques intervertébraux entre la vertèbre lombaire 5 et la vertèbre sacrée 1. Des déchirures musculaires au niveau des biceps peuvent également se produire suivant la prise des mains sur la barre [DELAVIER, 2010] [DELAVIER ET GUNDILL, 2010].

b. La flexion de jambes ou squat



Figure 5. Photographie de Zhanna Ivanova réalisant une flexion de jambe lors de l'European Junior Powerlifting Championships de 2002 [KOBERRICH, 2002b]

La flexion de jambes (Figure 5) peut être considérée comme un exercice majeur en musculation. C'est le mouvement le plus complet pour le développement musculaire des cuisses et aussi un des plus éprouvant pour les pratiquants.

Histoire

Les prémices du mouvement apparurent à la fin du XIX^{ème} siècle avec un des premiers culturistes connus : Eugène Sandow de son vrai nom Friedrich Wilhelm Mueller (1867-1925). Il précisa d'ailleurs ce mouvement dans un livre paru en 1894 : *Sandow's System on Physical Training*. Ce fut le point de départ de la technique d'exécution. D'autres athlètes ont contribué à son développement. Henry « Milo » Steinborn est le premier vrai spécialiste de *squat*. Il utilisait, dans les années 1920, une barre chargée sur son dos pour réaliser le mouvement. Durant les années 1950, d'autres athlètes ont popularisé cet exercice comme Paul Anderson, considéré aujourd'hui comme le père fondateur spirituel de la FA. C'est grâce à leur travail et à la réalisation de performances toujours plus impressionnantes que la flexion de jambe gagna en popularité dans les salles du monde entier. De nombreuses variantes ont également été inventées (jouant sur l'écartement des pieds, une phase de descente plus ou moins importante, le positionnement de la barre...) [GRIGONIS, 2012] [WARPEHA, 2015].

Technique

Son nom anglais, *squat* qui signifie s'accroupir, résume bien ce mouvement. L'objectif de cette épreuve est que l'athlète réussisse à s'accroupir et à se relever avec une charge sur le dos. Le mouvement peut se résumer en une flexion suivie d'une extension des membres inférieurs. Les caractéristiques morphologiques individuelles conduisent à des facilités et à des contraintes d'exécution différentes pour chaque sportif. La réalisation du geste et ses paramètres d'exécution, en plus de respecter les consignes du règlement, devra être adaptée par chacun. L'écartement des mains sur la barre, l'écartement des pieds, la position de la barre sur le dos, la vitesse du mouvement sont autant de points à travailler et à personnaliser.

L'athlète peut réaliser une flexion de jambes suivant différentes techniques. Comme pour le soulevé de terre, la réalisation et la mise en position de l'athlète diffère en fonction des particularités morphologiques, des forces et faiblesses du concurrent. Deux formes s'opposent : le *powerlifting squat* et l'*olympic squat*, où le principe du mouvement reste identique néanmoins l'amplitude et le positionnement différent. Plusieurs critères varient : l'emplacement de la barre au niveau du dos, la position des pieds, l'amplitude. Ces modifications changent les performances réalisées. En FA, l'objectif est de soulever les

barres les plus lourdes, c'est pourquoi le règlement favorise la pratique du *powerlifting squat* (amplitude réduite).

Au commencement, le concurrent se tient debout face à une barre chargée et placée sur un *rack* à une hauteur spécifique. Il saisit cette charge. Il la positionne soit au niveau de ses deltoïdes antérieurs en ne la mettant pas à moins de 3 cm au sommet de ce muscle - c'est la technique dite de *high bar squat* -, soit il la place plus bas au niveau de l'épine scapulaire - c'est la technique du *low bar squat* -. Le placement modifie des paramètres biomécaniques (leviers, moments de force, centre de gravité, morphologies particulières). Une fois sa position de départ acquise, l'athlète inspire, bloque sa respiration et contracte ses abdominaux afin de se stabiliser et de rigidifier son tronc (manœuvre de Valsalva).

Concernant le déroulement du mouvement, une notion importante est à préciser : le couloir de poussée. Ce couloir (définissant la projection de la surface de sustentation) est une zone virtuelle dans laquelle le centre de gravité de l'athlète doit rester sous peine de déséquilibre. Il est délimité par les bords des points d'appuis, à savoir les pieds. Pendant toute la durée de l'exercice, la charge doit descendre et être remontée dans ce plan vertical.

La technique est composée de deux étapes. La descente (Figure 6) ou flexion de jambes correspond à la première phase du mouvement (excentrique). Pour ce faire, l'athlète initie le mouvement par une flexion des hanches en projetant son bassin et ses fesses vers l'arrière (mouvement d'antéversion du bassin). Puis il fléchit les genoux afin de descendre. Lors du mouvement, le dos doit rester droit c'est-à-dire avec la colonne vertébrale droite (et non pas verticale), la tête étant alignée avec la colonne (ne pas regarder en haut afin d'éviter une hyper extension des cervicaux). Une fois en position accroupie, la surface supérieure des cuisses à l'articulation de la hanche (point C de la figure 6) doit être un peu plus basse que le haut des genoux (point D de la figure 6). Les tibias et les fémurs forment un angle inférieur à 90°. Ce passage est un point critique du mouvement car l'équilibre est précaire et les tensions sont maximales. Le buste ne doit en effet pas partir en avant et le dos ne doit absolument pas s'arrondir. Il faut veiller à toujours garder une légère cambrure dorsale par la contraction isométrique des muscles dorsaux et abdominaux. Dans cette position (image 4 de la figure 6), l'athlète doit se redresser pour revenir en position de départ. Cette extension correspond à la deuxième partie du mouvement (phase concentrique). Pour ce faire, il faut vouloir remonter les fessiers, conduire un mouvement de hanche et de bassin vers le haut et envoyer une force de projection dans les talons par la contraction des muscles des cuisses (en restant dans le couloir de stabilité). Le système nerveux grâce à des programmes moteurs va naturellement entraîner ce redressement des hanches et des fesses par la contraction simultanée des muscles « du bas du corps » (ischio-jambiers, quadriceps...). Il est également nécessaire de maintenir le gainage et de synchroniser la montée du buste et du haut du dos avec celle des fessiers sous peine de déséquilibre. La poussée de

démarrage doit être importante permettant l'accélération de la montée de la charge jusqu'au redressement complet et à la validation de l'essai (en position debout, les genoux verrouillés) [DELAVIER, 2010] [DELAVIER et GUNDILL, 2010].

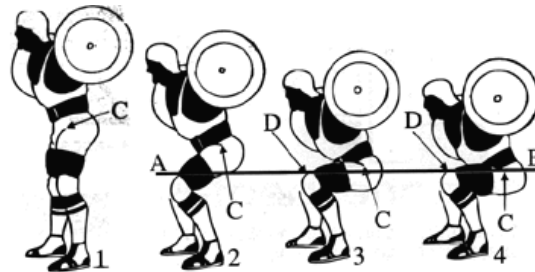


Figure 6. Illustration des étapes d'un squat durant sa phase excentrique [YLITALO-JAMES, 2012]

Informations diverses

La flexion de jambes est également un des exercices les plus complets en musculation. Elle stimule de nombreux groupes musculaires : quadriceps, fessiers, adducteurs, ischio-jambiers, mollets (soléaire et gastrocnémien), lombaires, abdominaux (Figure 4).

L'apprentissage de la technique doit être rigoureux, le risque de blessure étant élevé si l'athlète l'exécute de façon médiocre. La répétition d'efforts avec des charges lourdes et des techniques passables entraînent bien souvent des hernies discales, des pathologies au niveau articulaire (genoux) [DELAVIER, 2010] [DELAVIER et GUNDILL, 2010].

c. Le développé couché / bench press

Histoire

Des trois mouvements, le développé couché (Figure 7) est le plus récent. Toutefois vers la fin du XIX^{ème} siècle, un lutteur du nom de Georg Karl Julius Hackenschmidt effectua un geste qui y ressemblait. Ce dernier réalisa à même le sol un des premiers développés couchés « lourds » (à 159 kg) de l'histoire. Ce mouvement porte le nom de *supine press* ou *floor press*. Cette prouesse est d'autant plus remarquable que la position de départ complique énormément la tâche du sportif. C'est à la fin des années 1930 et surtout après la fin de la seconde guerre mondiale que le mouvement a été standardisé et reconnu [WARPEHA, 2015]. A l'heure actuelle, il est sans doute l'exercice le plus pratiqué et le plus populaire dans les salles de musculation [SUTPHIN, 2014].



Figure 7. Photographie d'Ivan Freyduin réalisant un développé couché lors de l'European Junior Powerlifting Championships de 2003 [KOBERRICH, 2003]

Technique

Comme précédemment, les caractéristiques morphologiques propres à l'athlète définissent son style et les paramètres d'exécution. Selon le règlement, le compétiteur adapte sa position sur le banc, le placement de ses pieds au sol, de son dos (arqué ou plat), de sa tête sur le banc, l'écartement des mains sur la barre (81 cm maximum).

En phase initiale, le sportif est allongé sur un banc de développé couché avec la tête, les épaules et les fessiers en contact avec le banc. Ses pieds sont plaqués au sol et la barre est posée sur des supports au-dessus de sa tête (à hauteur des yeux). Avant l'effort, l'athlète adopte une position sûre et optimale lui procurant davantage de force. Il contracte les muscles fixateurs des omoplates (trapèzes, rhomboïdes) pour les rapprocher et limiter l'impact de la charge sur les épaules. Dans le même temps, il peut cambrer le dos en créant une arche au niveau des lombaires. Ces actions vont éviter de trop étirer le muscle pectoral, engendrant moins de risque de déchirure musculaire et limiter l'amplitude du mouvement.

L'épreuve consiste à descendre la barre au niveau des pectoraux et à la remonter. Elle se résume en une flexion suivie d'une extension des bras qui va se dérouler en deux étapes (Figure 8). La phase de descente correspond à la partie excentrique de l'exercice. Le sportif saisit la barre (l'espacement des mains étant réglementé), la décroche du support et la descend jusqu'à faire contact avec ses pectoraux. Cette partie peut paraître aisée mais avec des charges lourdes, il est indispensable de contrôler la trajectoire de la barre et la vitesse de descente. Une fois la barre en contact avec les pectoraux, l'athlète doit marquer un temps d'arrêt. Ensuite, il y a l'étape dite de remontée, c'est la phase concentrique : l'athlète pousse la barre jusqu'à la position de départ bras tendus. Cette action de poussée nécessite une production de force par la contraction des deltoïdes (faisceau claviculaire), des pectoraux et des triceps particulièrement. Dans le même temps, l'athlète exerce une poussée horizontale avec ses pieds (*leg drive*). Le transfert des forces vers la partie supérieure du corps va potentialiser le résultat en rendant le mouvement plus stable et efficace [DELAVIER, 2010] [DELAVIER ET GUNDILL, 2010] [VOUILLOT, 2000].

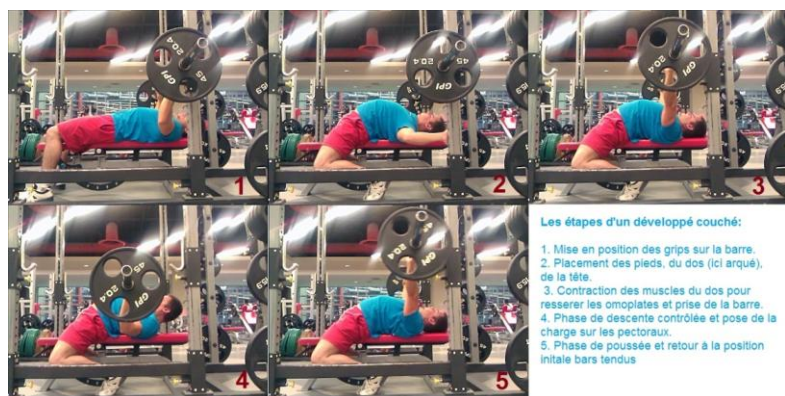


Figure 8. Les étapes d'un développé couché : du placement à l'exécution du mouvement [NARVAEZ, 2014]

Informations diverses

Le développé couché fait intervenir plusieurs groupes musculaires : pectoraux, faisceaux antérieurs des deltoïdes, triceps, grand dorsal, trapèzes, courte portion du biceps (Figure 4). C'est un exercice dangereux lorsque les charges utilisées sont importantes. Dès lors, il doit être pratiqué de manière maîtrisée, avec un pareur ou du matériel spécifique de sécurité. L'athlète peut se déchirer le grand pectoral, avoir des douleurs aux épaules, s'abîmer la coiffe des rotateurs ou subir un enfoncement de la cage thoracique si la barre lui tombe dessus.

2. Force athlétique et réglementation

a. Notions de catégories : sexe, âge, poids, équipements

Pour favoriser l'équité entre athlètes, différentes catégories existent. Les compétiteurs sont distingués par leur sexe, puis classés par tranche d'âge (Tableau I).

Tableau I. Catégories d'âge en vigueur au sein de l'IPF et de la FFForce [FFForce, 2016] [IPF, 2016a]

Au niveau international selon l'IPF			Au niveau national selon la FFForce		
Catégorie	Homme	Femme	Catégorie	Homme	Femme
Sub-juniors	14 à 18 ans	14 à 18 ans	Cadets	15 à 16 ans	15 à 16 ans
			Sub-juniors	17 à 18 ans	17 à 18 ans
Juniors	19 à 23 ans	19 à 23 ans	Juniors	19 à 23 ans	19 à 23 ans
			Seniors	24 à 39 ans	24 à 39 ans
Masters 1	40 à 49 ans	40 à 49 ans	Masters 1	40 à 49 ans	40 à 49 ans
Masters 2	50 à 59 ans	50 à 59 ans	Masters 2	50 à 59 ans	50 à 59 ans
Masters 3	60 à 69 ans	60 à 69 ans	Masters 3	60 à 69 ans	60 à 69 ans
Masters 4	>70 ans	>70 ans	Masters 4	>70 ans	>70 ans
Open	14 ans et plus	14 ans et plus	Open	17 et plus	17 et plus

Il est à noter que la catégorie Masters 4 (athlètes de plus de 70 ans) n'existe pas pour chaque catégorie de poids. Ces derniers sont récompensés uniquement à l'indice. Au plan national, des exceptions sont également à voir pour la catégorie Cadet (moins de catégories de poids, différences dans la réglementation).

La catégorie *Open* est, quant à elle, ouverte à tous, l'âge n'est pas pris en compte. L'athlète peut donc s'inscrire soit en *Open*, soit dans la catégorie d'âge qui lui est propre. En France, cette catégorie n'existe que lors de finales nationales, dans les autres divisions (départementales, régionales, interrégionales...), les compétiteurs sont obligatoirement placés dans la catégorie de leur âge (au jour de la compétition).

Des différences sont à noter entre la fédération internationale et sa filière française. Des catégories d'âge supplémentaires existent en France et le changement de catégorie ne se fait pas de la même manière. L'IPF suit la logique du calendrier civil soit du 01 janvier au 31 décembre, alors que la FFForce doit s'adapter au calendrier scolaire, du 1^{er} septembre de l'année précédente au 31 août de l'année en cours. Par exemple, un athlète ayant 19 ans en mai 2016 passera dans la catégorie des Juniors au 1^{er} janvier 2016 en IPF alors qu'en France, ce changement aura lieu seulement à partir du 1^{er} septembre 2016 [IPF, 2016a] [FFForce, 2016].

Enfin il y a une classification par catégorie de poids (Tableau II).

Tableau II. Catégories de poids en vigueur au sein de l'IPF et de la FFForce [IPF, 2016a]

Catégories de Poids	Messieurs		Catégories de Poids	Dames	
	Open et Masters	Sub-juniors et Juniors		Open et Masters	Sub-juniors et Juniors
53kg	-	≤ 53kg	43kg	-	≤43kg
59kg	≤ 59kg	53.01 à 59kg	47kg	≤47kg	43.01 à 47kg
66kg	59.01 à 66kg	59.01 à 66kg	52kg	47.01 à 52kg	47.01 à 52kg
74kg	66.01 à 74kg	66.01 à 74kg	57kg	52.01 à 57kg	52.01 à 57kg
83kg	74.01 à 83kg	74.01 à 83kg	63kg	57.01 à 63kg	57.01 à 63kg
93kg	83.01 à 93kg	83.01 à 93kg	72kg	63.01 à 72kg	63.01 à 72kg
105kg	93.01 à 105kg	93.01 à 105kg	84kg	72.01 à 84	72.01 à 84
120kg	105.01 à 120kg	105.01 à 120kg	+ 84kg	≥84kg	≥84kg
+ 120kg	≥120.01kg	≥120.01kg	-	-	-

Les athlètes concourent également en fonction de l'utilisation ou non d'équipements spécifiques. S'ils participent sans équipement de force, ils sont dans la catégorie dite classique ou *raw*. Au contraire, si leurs essais sont réalisés avec des maillots de force, de combinaisons de *squat* ou de soulevé de terre, ils sont en catégorie dite équipée.

L'équipement autorisé est strictement réglementé et contrôlé. Il peut être composé d'une combinaison d'assistance (maillot élastique rigide), de bandes élastiques résistantes (poignet, genou), d'une ceinture lombaire et d'autres accessoires (genouillère par exemple). L'objectif du matériel est d'offrir à l'athlète plus de force et donc d'obtenir de meilleurs résultats. La déformation des équipements lors de la phase excentrique du développé couché ou de la flexion de jambes va permettre d'emmagasiner de l'énergie élastique. Cette dernière sera restituée lors de la phase concentrique, aidant ainsi le sportif lors de son effort. L'équipement offre aussi une meilleure stabilité lors de l'effort et une plus grande protection articulaire. Ceci explique donc la séparation des athlètes en deux catégories [IPF, 2016b].

b. Arbitres, juges et équipements

Le règlement détermine les catégories, l'exécution des mouvements et le matériel autorisé. Afin de le faire respecter, les compétitions se déroulent sous le contrôle de juges. Ils sont présents de la pesée jusqu'à la fin des épreuves.

Lors d'une compétition, chaque mouvement réalisé par l'athlète doit respecter des consignes très précises. Pour cela, que la réglementation fournit des critères d'appréciation pour chaque exercice. Les arbitres supervisent le sportif et l'exécution de son mouvement en lui indiquant le départ (ordre oral plus un mouvement de bras), la poussée (pour le *bench press*) et la fin. En plus de guider le sportif, ils contrôlent et valident sa technique d'exécution. Si un des points du règlement n'a pas été respecté, l'essai n'est pas validé.

Il en va de même pour le matériel nécessaire au déroulement des compétitions. Cela va des dimensions du plateau où les athlètes concourent, au poids des disques et des barres, des supports et bancs jusqu'au système de chronométrage. Les vêtements des compétiteurs doivent également être réglementaires.

3. Déroulement d'une compétition

a. La pesée et les contrôles

Une compétition de FA commence toujours par la pesée des athlètes. Sa présence permet de contrôler que le poids du compétiteur est bien conforme à la catégorie pour laquelle il s'est inscrit. Cette inscription se fait au plus tard 21 jours avant la compétition dans le cadre de finales nationales et au moins 7 jours avant les finales « deuxième pas », départementales, régionales ou interrégionales (en France). Si le sportif est qualifié dans plusieurs catégories de poids, il ne devra en retenir qu'une seule.

La pesée est faite sous le contrôle d'arbitres (au moins deux), dans le respect du règlement. Elle se déroule deux heures avant la compétition et dure une heure trente. L'athlète se présente nu ou en sous-vêtements. Si son poids de corps est non conforme, une

repesée est faite dans la limite du temps imparti pour la pesée (soit 90 min). Au terme de ce délai, si le poids ne correspond toujours pas, le compétiteur est éliminé.

En plus du contrôle du poids, les officiels vérifient le matériel de l'athlète et peuvent procéder à des contrôles antidopage. Les compétiteurs ne mesurant pas tous la même taille, ils doivent fournir aux juges la hauteur à laquelle la barre doit être positionnée pour le développé couché et la flexion de jambes (la hauteur des sécurités mise sera également précisée) [IPF, 2016a].

b. Les épreuves

L'athlète a le choix de concourir pour l'ensemble des trois mouvements ou juste le développé couché. Une compétition de FA se déroulent toujours de la même façon : les sportifs réalisent d'abord la flexion de jambes puis le développé couché et enfin le soulevé de terre. Ils vont avoir trois essais à réaliser pour chaque épreuve : c'est la progression par tour. Ils passent l'un après l'autre afin de réaliser leur premier essai (cela correspond au tour 1). Une fois que tous sont passés, ils entament leur deuxième essai (tour 2), idem pour le tour 3. Si un groupe est constitué par un nombre restreint de compétiteurs, les essais s'enchaînent rapidement et un repos compensatoire est alors accordé.

L'annonce du poids à mettre pour le premier essai est faite durant la pesée. La charge suivante est indiquée dans la minute suivant la réalisation du mouvement. En aucun cas, elle ne devra être inférieure à celle du premier essai (même en cas d'échec) sauf pour le dernier essai du soulevé de terre (celui qui clôture la compétition). Chaque essai est supervisé par 3 arbitres, ce sont eux qui donnent les consignes de départ et d'exécution du mouvement et qui valident ou non la prestation de l'athlète.

Une compétition de FA s'étend sur plusieurs heures. Il peut s'écouler un certain temps entre la pesée, les premiers essais et la fin du concours. C'est une période qui n'est pas forcément facile à gérer nerveusement et physiquement. L'attente, la répétition des efforts intenses, la fatigue, la faim, la concentration, la détermination sont autant de facteurs pouvant jouer sur les résultats

Au final, la somme des meilleurs essais sur les trois mouvements donne le score total réalisé et cette valeur détermine le classement établi en fonction de l'âge, du poids et du sexe de l'athlète. Plusieurs cas peuvent se présenter. Si le concurrent échoue aux trois essais prévus pour une même épreuve, il est éliminé. En cas d'égalité de score, l'athlète le plus léger l'emporte. Il existe un autre classement par indice qui permet de classer les athlètes en dehors de toute notion de catégorie [IPF, 2016a].

E. Quelques chiffres

1. Nombre de licenciés en France

L'évolution du nombre de licenciés en France au sein de l'ancienne FFHMFAC a été récapitulé depuis le début des années 2000 jusqu'à 2014 (Tableau III). Ces chiffres sont valables pour une seule fédération, le nombre total de licenciés toutes fédérations confondues étant supérieur.

Tableau III. Evolution du nombre de licencié au sein de la FFHMFAC de 2001 à 2014 [FFHMFAC, 2014]

Année	Nombre total de Licenciés	Hommes	Evolution		Femmes	Evolution	
		Effectif	Nombre	%	Effectif	Nombre	%
2001-2002	6037	4524	-	-	1513	-	-
2013-2014	15778	11770	-	-	4008	-	-
TOTAL	+9741 +161%	-	+7246	+160	-	+2495	+165

La FA est un sport mineur en France avec 15778 licenciés en 2014. A titre de comparaison, ce sport peut se rapprocher de sports comme le football américain ou le hockey sur glace. Cette faible attractivité engendre plusieurs conséquences : une médiatisation moindre entraînant moins de sponsors, d'argent et donc des athlètes (même à haut niveau) qui sont pour la plupart non professionnels et non rémunérés.

Le nombre de licenciés a évolué en un peu plus de 10 ans et s'est multiplié par 2,5 soit une croissance de près de 160% malgré une médiatisation faible. Par ailleurs, les femmes représentent 25% des effectifs. Ce chiffre va à l'encontre des idées reçues sur l'image que peut évoquer cette activité aux yeux du grand public.

2. Les différents records

Ci-dessous sont présentés quelques records de la discipline accomplis au sein de l'IPF et homologués par cette dernière (Tableaux IV, V, VI et VII). Ce ne sont pas forcément les meilleures performances sachant qu'un record peut être établi dans chaque fédération internationale de FA et dans d'autres sports comme les compétitions d'hommes forts.

Tableau IV. Records masculins (en kg) réalisés en IPF dans 3 catégories de poids différentes en Open équipé [STETSENKO, 2016]

Catégorie de Poids Epreuves	74kg	93kg	+120kg
Flexion de jambe	367.5	395	500
Développé couché	245	300	401.5
Soulevé de terre	327.5	370.5	397.5
Meilleur Total	905	1022.5	1271.5

Tableau V. Records masculins (en kg) réalisés en IPF dans 3 catégories de poids différentes en Open raw [STETSENKO, 2016]

Catégorie de Poids Epreuves	74kg	93kg	+120kg
Flexion de jambe	260	303	426
Développé couché	211	232.5	270.5
Soulevé de terre	310.5	320	375
Meilleur Total	712.5	847.5	1012.5

Tableau VI. Records féminins (en kg) réalisés en IPF dans 3 catégories de poids différentes en Open équipé [STETSENKO, 2016]

Catégorie de Poids Epreuves	57kg	72kg	+84kg
Flexion de jambe	222.5	255	310
Développé couché	145	177.5	227
Soulevé de terre	210	248	270.5
Meilleur Total	555	642.5	753

Tableau VII. Records féminins (en kg) réalisés en IPF dans 3 catégories de poids différentes en Open raw [STETSENKO, 2016]

Catégorie de Poids Epreuves	57kg	72kg	+84kg
Flexion de jambe	172.5	187.5	272.5
Développé couché	115	125	147.5
Soulevé de terre	190	242.5	237.5
Meilleur Total	447.5	540	645

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de l'étude de ces tableaux. Premièrement, les athlètes réalisent de meilleures performances à la flexion de jambes puis au soulevé de terre et enfin au développé couché. Cela paraît logique au vu des exercices, ainsi le corps humain développe davantage de force par l'utilisation des groupes musculaires de sa partie basse (notamment via les muscles des cuisses).

Ensuite, les performances augmentent avec le poids de l'athlète et elles sont plus élevées chez les hommes que chez les femmes. Le développement et la production de force résultent donc en partie du poids et du sexe de l'athlète (masse musculaire, densité osseuse, système ostéo-tendineux, production d'hormones).

Pour finir, l'utilisation de matériels spécifiques permet une nette amélioration des résultats, le gain se situe autour des 20% [STETSENKO, 2016].

F. Amalgames et idées reçues

La FA est une discipline sportive mineure en France par sa faible médiatisation et un nombre réduit de pratiquants. Ces facteurs engendrent inéluctablement une méconnaissance, des idées reçues et des amalgames aux yeux du grand public. Avec cette sous-partie et en me basant sur les données précédentes, j'essayerai d'apporter une vision plus réaliste de cette pratique.

Beaucoup de personnes confondent la FA et la musculation. La musculation est considérée comme une activité sportive permettant le renforcement physique d'une personne, cependant elle n'est pas définie comme une discipline sportive à part entière (avec des compétitions et un championnat). L'ensemble de ces exercices peut servir de base d'entraînement pour des athlètes, notamment en FA. Plus simplement, ces exercices peuvent aussi être pratiqués dans un but récréatif. Par exemple, la différence entre musculation et FA se rapproche de celle entre jogging et sports de course.

La FA est relativement proche de l'haltérophilie et beaucoup de personnes confondent les deux disciplines. Ainsi ce sont deux sports de forces ayant un même objectif, celui de soulever des charges, les plus lourdes possibles. Néanmoins, des différences notoires existent tant par les épreuves réalisées par les athlètes que par les méthodes d'entraînement, le déroulement des compétitions et les programmes nutritionnels qui en découlent. En premier lieu, les mouvements qui les composent marquent leurs spécificités et permettent de les différencier. En haltérophilie, les athlètes pratiquent l'arraché et l'épaulé-jeté. Ce sont des mouvements demandant une plus grande amplitude d'exécution et par

conséquent plus de technique et de souplesse de la part des athlètes. Mécaniquement les charges utilisées vont être moins lourdes qu'en FA. Ces différences sont autant de facteurs engendrant la spécificité des méthodes d'entraînement, des qualités physiques des athlètes (plus de vitesse d'exécution, d'explosivité mais moins de force maximale pour l'haltérophile), des équipements (par exemple, les barres utilisées peuvent sembler identiques mais elles sont en réalité plus rigides en force athlétique). Les règlements sont aussi distincts : les catégories de poids et le déroulement d'une compétition ne sont pas les mêmes. En FA, les athlètes progressent au tour par tour, en haltérophilie, la progression se fait en fonction du poids à soulever.

Moins fréquemment, une confusion peut exister avec les compétitions d'hommes forts (*strongmen* en anglais), où les épreuves sont également basées sur la force des compétiteurs. A l'origine, et avant que la FA et que le culturisme ne soient codifiés, l'homme fort était le terme générique pour qualifier quelqu'un qui exhibait sa force lors de représentation. A l'heure actuelle, c'est une discipline à part entière avec des épreuves précises. Parmi ces dernières, il y a des mouvements présents en FA, c'est pourquoi des records absolus pour ces épreuves sont détenus par des *strongmen*. Mais ce sont des mouvements parmi d'autres, car les compétitions d'hommes forts regroupent de nombreuses autres épreuves spectaculaires.

Enfin et même si c'est moins courant, le culturisme peut être confondu avec la FA. L'objectif entre les athlètes est différent toutefois la méthode pour y parvenir peut être identique. Un culturiste n'a pas pour but de soulever des charges les plus lourdes possibles, ni d'être le plus fort dans sa catégorie. Son objectif est purement esthétique, il recherche la meilleure définition musculaire avec une symétrie parfaite car c'est sur ces qualités qu'il va être jugé. Comme les mouvements réalisés en FA sont les bases de la musculation, il est normal que beaucoup d'athlètes *bodybuilders* les utilisent afin de gagner en hypertrophie musculaire. Les programmes d'entraînement peuvent comporter les mêmes exercices mais pratiqués de manière complètement différente (en termes de répétition, de charge...).

G. Conclusion

A travers cette partie, j'ai tenté de mettre en lumière la pratique de la FA car il était nécessaire d'apporter ces informations avant de développer le reste de mon travail. Une présentation complète de la FA me permet de fixer un point de départ pour le développement des parties suivantes de mon manuscrit.

Comment évoquer les adaptations physiologiques engendrées par cette pratique sans avoir les connaissances de base liées à ce sport ? Nous venons de voir que l'organisme subit un stress conséquent qui est lié à la répétition des efforts. Les systèmes physiologiques impactés vont devoir évoluer, permettant de ce fait à l'athlète de gagner en force. Lors de ma prochaine partie, je vais donc éclaircir les mécanismes physiologiques d'un gain de force.

Ces explications me permettent également de justifier de l'importance des facteurs nutritionnels dans la démarche de progression des athlètes. Lors de ma présentation, plusieurs points ont clairement permis de voir l'importance de mettre en place une alimentation adaptée chez ce type d'athlètes. L'intensité des efforts demandée lors des épreuves, la notion de catégorie de poids, la longue durée des compétitions sont autant de critères qui justifient une prise en charge alimentaire spécifique. La connaissance du métabolisme humain et des bases solides en nutrition permettront l'élaboration de stratégies nutritionnelles adaptées aux objectifs de chacun.

2. L'ENTRAÎNEMENT EN FORCE ATHLETIQUE ET LES ADAPTATIONS INDUITES

Pour un athlète, la recherche de performance passe par une préparation optimale, il dispose pour cela d'outils : l'entraînement et la récupération. Les piliers permettant à l'organisme de supporter et de s'adapter à cette préparation étant principalement le repos et l'alimentation. L'élaboration d'un programme permettant l'optimisation des performances demande diverses connaissances. Il est indispensable de s'intéresser au sportif lui-même et à ses objectifs, il faut déterminer son niveau, ses forces et faiblesses. Cela nécessite également d'avoir une bonne compréhension du sport pratiqué. L'étude de la physiologie de l'effort de force déterminant les capacités requises et nécessaires à développer et les mécanismes d'adaptations permettant d'être plus fort est indispensable. A partir des résultats obtenus, les méthodes les plus efficaces doivent être retenues comme standards. Ce raisonnement conduit inéluctablement à la mise au point de réponses nutritionnelles adaptées aux besoins spécifiques de l'athlète. Ma réflexion sur cette partie consacrée à la physiologie de ce sport sera donc la suivante.

Dans un premier temps, je dois poser les bases théoriques et pratiques des concepts d'entraînement et de récupération. Par le biais de ces outils fondamentaux, l'athlète utilise une des facultés innées qu'il a sa disposition : la capacité d'adaptation. Après ces généralités, il faudra fixer les grandes bases de l'entraînement en FA. Ce travail n'aura toutefois pas la prétention d'établir les meilleures méthodes et programmes à appliquer mais juste de donner des règles communes. Il est pour ma part utile d'y consacrer un chapitre car avant d'aborder les adaptations induites, il est logique de connaître les méthodes les plus optimales par lesquelles il est possible de les amener. Il faut ensuite analyser les effets que l'entraînement produit sur l'organisme et les adaptations qui en résultent. L'analyse d'études sur la physiologie de l'effort de force étaiera ce travail.

Pour récapituler, c'est la connaissance d'une part de l'entraînement spécifique de l'athlète et d'autre part des adaptations induites qui me permettront d'appréhender les besoins nutritionnels spécifiques du pratiquant de FA.

A. Entraînement et récupération

L'amélioration des capacités sportives d'un individu est intimement liée aux adaptations physiques et psychiques induites par la répétition et l'alternance de phases d'entraînement et de récupération. Ce processus repose sur l'application d'exercices spécifiques et la mise en place de méthodes de récupérations (alimentation, sommeil). Cela concerne aussi bien les sportifs amateurs que les athlètes professionnels. La distinction est à faire quant aux objectifs de chacun et aux moyens à engager. Ainsi, le sportif de haut niveau recherche une optimisation de ses capacités sur le long terme tout en atteignant son

plein potentiel les jours de compétition. Cette recherche de résultats et de performances implique la planification d'un programme spécifique.

1. Entraînement

a. Définition

L'entraînement sportif peut se définir comme l'ensemble des exercices permettant à un individu d'acquérir des compétences et d'améliorer ses performances. Il place l'organisme face à une situation l'obligeant à s'adapter. L'effort sportif est considéré comme une charge d'exercices provoquant un stress. C'est la répétition des entraînements et la somme des contraintes physiques, psychiques, émotionnelles qui représentent la stimulation nécessaire afin de progresser. La performance générale s'améliore car l'organisme du sportif évolue et s'adapte afin de mieux les supporter [RIPPETOE ET BAKER, 2013].

b. Les principes de l'entraînement

Les bases de l'entraînement s'articulent toujours autour de plusieurs grands principes présentés ci-dessous.

Individualisation : l'exécution d'un programme d'entraînement identique ne va pas systématiquement entraîner des résultats similaires d'un individu à l'autre. Ce principe est lié à la variabilité de facteurs entre les personnes. Le patrimoine génétique unique de chaque individu est à l'origine de différences morphologiques, métaboliques, nerveuses. Il faut donc placer l'individu et ses objectifs au centre de la démarche sportive.

Spécificité : il s'agit ici d'adapter les exercices, leurs exécutions ainsi que les méthodes de récupération au sport pratiqué. Le type d'activité et la nature des sollicitations décident des propriétés physiques et des qualités requises ainsi que des voies métaboliques et des filières énergétiques entrant en jeu. Un coureur de fond n'applique pas le même programme qu'un lanceur de poids, c'est évident. Mais même pour des sports très proches, des différences sont à faire. L'haltérophile ne s'entraînera pas de la même manière que le pratiquant de FA pourtant les deux sportifs tendent à l'augmentation de la force. Conjointement au sportif, le sport et ses caractéristiques sont également au centre de la démarche.

Réversibilité : l'entraînement doit être régulier. Un arrêt prolongé entraîne une diminution des résultats. Il faut distinguer les phases de repos nécessaires pour la récupération, d'un arrêt continu (volontaire ou non) trop long. Si le corps n'est plus stimulé, le bénéfice engendré par les phénomènes d'adaptations et de surcompensation va s'amoinrir.

Progressivité et surcharge : le volume puis l'intensité du travail doivent augmenter progressivement. Cette progression doit être définie méthodiquement par la planification d'objectifs à atteindre au cours des différents cycles de progressions. La notion de surcharge progressive ou *overload* en anglais est primordiale. Une surcompensation physique n'a lieu que si l'intensité de l'effort est importante. Le fait de rester stable au niveau des charges d'exercice entraîne une stagnation des résultats. A contrario une augmentation trop brutale peut se justifier dans certains cas mais est sujette à un surmenage ou à des blessures.

Alternance travail-repos : il faut bien se rappeler que ce n'est pas durant l'effort que l'organisme progresse mais bien pendant les phases de récupération. L'entraînement est le facteur déclenchant les adaptations chroniques, mais elles se mettent en place lors des phases de repos. Ne pas respecter cette alternance et enchaîner les stimulations de manière trop rapprochées nuit à la performance en engendrant de la fatigue, du surmenage, des risques de blessures (phénomène de surentraînement). A l'inverse, trop de temps de repos entre chaque effort ne permettra pas l'augmentation des performances. Ce phénomène se rapproche de celui que je vais évoquer, à savoir la périodicité.

Périodicité : c'est un principe important qui définit la fréquence d'entraînement optimale. Il est essentiel de comprendre qu'un programme d'entraînement n'est pas linéaire. Le planifier et le répartir sous forme de cycles sont nécessaires et ce pour plusieurs raisons. La principale étant que l'athlète a pour objectif de présenter un état de forme élevé au cours des compétitions, ce qui n'est pas forcément nécessaire en dehors de ces dates (en hors saisons). Comme un organisme ne peut maintenir un haut niveau fonctionnel tout au long de l'année (sous peine de surentraînement, de blessures), il faut faire coïncider le pic d'état de forme du sportif avec les dates clés du calendrier sportif. Le développement de la forme suit le cycle d'acquisition, de stabilisation et de perte provisoire. C'est pourquoi certaines variables de l'entraînement différeront en fonction de la période dans laquelle se trouve le sportif.

Périodisation : un physiologiste russe du nom de Matveev a élaboré, au cours des années 1960-1970, un système d'entraînement dit par blocs. En analysant les résultats sportifs de nombreux athlètes soviétiques, il a permis de structurer l'entraînement d'un sportif en divisant les saisons sportives sous forme de différents cycles évolutifs. Son concept de périodisation permet d'organiser et de planifier l'entraînement (l'unité fonctionnelle étant la séance d'entraînement) [LECA, 2016]. Son livre « La base de l'entraînement » édité en 1980 est encore aujourd'hui, une référence pour de nombreux athlètes, entraîneurs, professeurs.

Selon lui, le développement des qualités sportives se fait suivant un macrocycle qui réunit les trois phases de progressions athlétiques. Tout d'abord, le sportif passe par une phase préparatoire ou d'acquisition avec un volume de travail élevé. Elle permet d'améliorer les principaux systèmes fonctionnels de l'organisme, la condition physique générale et apporte une aisance technique à l'athlète. Après cette période, une phase d'intensification ou précompétitive suit. L'intensité des séances augmente au détriment du volume permettant de se rapprocher des objectifs en renforçant majoritairement le système nerveux central. La nature et l'intensité des sollicitations doivent se rapprocher de celles qui se déroulent en compétition. La phase de compétition fait suite à cette période. Les jours ou semaines avant les épreuves, il faut que la capacité de travail soit optimale. L'entraînement doit si possible se dérouler aux mêmes horaires que les épreuves prévues. Par contre, il est nécessaire de se focaliser sur l'état du sportif sans vouloir améliorer à tout prix ses capacités fonctionnelles. Ce n'est évidemment pas le moment de risquer blessures et fatigue. Après quoi, le sportif suit une phase transitoire de récupération post compétitive obligatoire (hors saison). Même si l'athlète doit se reposer, cette phase ne signifie pas un arrêt total de l'activité. Un niveau d'entraînement minimum doit tout de même être maintenu (de manière plus modérée) afin de recommencer un nouveau macrocycle dans les meilleures conditions.

Une saison sportive est donc divisée en un ou plusieurs macrocycles (avec une durée et un contenu variables). Son intérêt est de permettre une montée en puissance progressive de l'athlète jusqu'aux dates butoirs par une élévation du niveau de préparation physique puis une diminution de l'activité pour récupérer. Il peut s'étaler de quelques mois à une année en fonction du sport. Le macrocycle se divise en plusieurs mésocycles (de 3 à 6 semaines), eux-mêmes séquencés en microcycles (d'une durée de quelques jours à plus d'une semaine). Cette organisation permet de moduler très précisément certaines variables d'entraînement. Le but étant de contrôler chaque étape de progression [LECA, 2016].

En conclusion, pour planifier un entraînement, il convient de respecter ces principes. Il faut penser de manière rationnelle en l'adaptant au sportif, décider des exercices à mettre en place, en respectant des phases d'effort et de récupération. Exprimer son plein potentiel peut prendre de nombreuses années de pratique, continuer à progresser en évitant le surentraînement est affaire de patience, de rigueur, de travail. Enfin il ne faut pas oublier que la forme d'un individu est un état provisoire, planifier son entraînement a aussi pour objectif de faire correspondre les périodes de forme avec les objectifs du moment.

2. Récupération, surcompensation et adaptations

Les modifications transitoires ayant lieu durant l'effort entraînent des perturbations et un déséquilibre de l'homéostasie (lésions, diminution des stocks de substrats, modification de l'équilibre acido-basique...) obligeant l'athlète à une phase de récupération. Tous ces

changements sont les vecteurs permettant à l'organisme de réaliser l'effort. La récupération représente le moyen pour l'organisme de revenir à son état initial. L'organisme s'appuie principalement sur deux piliers : le sommeil et l'alimentation. Si chacune de ces composantes de la récupération est apportée de manière qualitative et quantitative, le corps retrouvera son état initial. Ce n'est pas tout à fait correct dans le cas d'un entraînement visant à améliorer les capacités physiques. Au lieu de retrouver l'équilibre de son homéostasie, il va surcompenser [RIPPETOE ET BAKER, 2013].

La surcompensation (Figure 9) a lieu grâce à la surcharge progressive (*overload*). Si l'intensité de la charge d'entraînement est suffisamment forte, l'organisme initie des mécanismes lui permettant d'atteindre un seuil au repos supérieur à celui qu'il possédait avant l'entraînement (plus de capacités énergétiques, de meilleures structures physiologiques...). L'intensité de travail élevée engendre un stress. Cette stimulation doit perturber suffisamment intensément l'homéostasie pour provoquer une surcompensation [RIPPETOE ET BAKER, 2013]. Le délai d'apparition de ce phénomène dépend de l'activité pratiquée et de la filière énergétique empruntée (délai rapide pour des efforts intenses, plus long dans le cadre d'exercices d'endurance) [TURGEON-DESROCHES, 2016].

Pour que l'athlète s'améliore et évolue dans le temps, la charge d'exercice doit être répétée de manière régulière et être plus intense à chaque fois. C'est la notion de surcharge progressive. La fatigue survenant après l'effort pourrait être le stimulus nécessaire à ces transformations, afin que l'organisme puisse gérer plus efficacement la situation à laquelle il a été soumis. Il s'adapte dans l'hypothèse éventuelle d'une nouvelle confrontation, l'objectif étant d'éviter que l'homéostasie ne soit aussi fortement bouleversée par une future charge d'exercices [PREVOST, 2003].

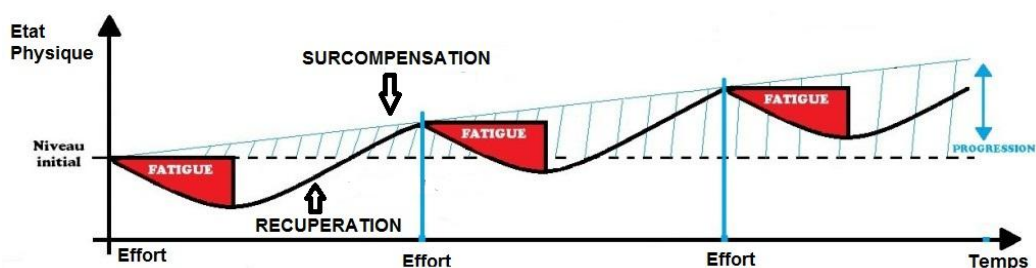


Figure 9. Principe de progression par surcompensations successives [LEON, 2016]

Le délai entre deux stimulations doit être planifié et respecté et ce pour deux raisons principales. Tout d'abord pour ne pas perdre les acquis si l'écart entre les deux séances est trop important. Deuxièmement pour ne pas sur-solliciter l'organisme par des entraînements trop rapprochés et le conduire dans un état de surentraînement (détérioration des

performances, problèmes physiques, psychiques). La période de récupération est au centre de la démarche sportive, au même titre que l'entraînement [RIPPETOE ET BAKER, 2013].

3. Homéostasie et adaptations

Dans le cas d'un entraînement, les adaptations sont d'ordre biologique. Elles peuvent être considérées comme des modifications de certaines propriétés structurales (morphologiques) et fonctionnelles de l'organisme à la suite d'un effort physique.

Les adaptations aiguës correspondent à des phénomènes se produisant lors de l'effort (physiologie de l'exercice) ou juste après. C'est une modification de l'homéostasie permettant la mobilisation des ressources nécessaires à la réalisation de l'activité physique. Durant l'entraînement, le corps déclenche des processus afin de fournir l'énergie nécessaire. Les structures et les fonctions corporelles se modifient aussi afin de répondre le plus efficacement possible à la tâche demandée. Ce déséquilibre temporaire de l'homéostasie (la déplétion des réserves énergétiques, les traumatismes et les lésions occasionnées par l'effort) doit être rapidement restauré.

Les adaptations chroniques définissent des modifications fonctionnelles et structurales à moyen et à long terme. Ces modifications apparaissent après la répétition d'efforts par les phénomènes successifs de surcompensation [PREVOST, 2003].

Les adaptations diffèrent aussi par leurs caractères : spécifiques ou générales, ainsi que par leur nature : fonctionnelles ou organiques. Pour comprendre le caractère immédiat et général d'une adaptation, il faut expliquer le phénomène de syndrome général d'adaptation (ce syndrome n'est donc pas spécifique d'une activité sportive) [VIRU, 1995].

a. *Syndrome général d'adaptation : adaptation immédiate non spécifique*

Le professeur Hans Selye a défini, dans les années 1930, la notion de syndrome général d'adaptation. C'est un ensemble de processus physiologiques non spécifiques se déroulant à la suite d'un stress (physique, psychologique). D'après lui, lors d'un stress, l'organisme réagit de manière immédiate et identique (non spécifique) afin de nous préserver. Pour ce faire, le corps utilise les deux voies de communication dont il dispose : la voie nerveuse rapide via le système sympathique et la voie chimique plus lente via l'axe hypothalamo-hypophyso-surrénalien. L'objectif étant d'activer ou d'inhiber des fonctions précises du corps par l'intermédiaire d'hormones. C'est un syndrome qui a une dimension biologique, émotionnelle et psychologique (chacun interprétant différemment une situation donnée). Il peut être décrit comme une réaction de défense et de survie qui se déroule en trois étapes. Une extrapolation peut être réalisée entre son postulat et les phénomènes liés à un effort car les perturbations hormonales observées au cours d'un stress sont proches de celles survenant au cours d'un exercice [BARTOLAMI, 2015].

Premièrement, il y a la réaction dite d'alarme, elle est immédiate et correspond à la mobilisation des ressources afin de préparer l'individu à l'épreuve. Elle entraîne ce que l'on nomme en anglais « *the fight or flight response* » (en français la lutte ou la fuite). Le système orthosympathique va entraîner la libération de noradrénaline d'une part et la libération d'adrénaline dans le système sanguin (par la glande médullosurrénale stimulée par l'hypothalamus) d'autre part. Ces hormones vont induire des réponses métaboliques spécifiques comme la mobilisation des réserves énergétiques en vue de l'effort (production de substrats énergétiques avec la dégradation du glycogène en glucose) pour produire de l'ATP. Les muscles vont être sollicités et ils se doivent d'être correctement approvisionnés. Il y a donc une augmentation du débit sanguin, de la pression artérielle, du rythme respiratoire. Parallèlement, des fonctions non utiles comme la digestion vont être mises au repos. C'est une phase transitoire qui est souvent décrite comme une « décharge d'adrénaline » [BARTOLAMI, 2015].

Si le stress persiste, le corps entre alors en phase de résistance et essaye de compenser l'impact de la première phase. A partir de ce moment, l'organisme s'adapte sur le long terme, il ne peut de toute manière pas rester en phase d'alarme, trop coûteuse en énergie. L'organisme doit agir tout en maintenant un niveau élevé de performance et de concentration. Il y a sécrétion de glucocorticoïdes par les corticosurrénales (l'axe hypothalamo-hypophysaire est activé). Le cortisol libéré module l'expression génique et permet la régulation de certaines réactions de la phase d'alarme en diminuant le fonctionnement de certaines activités physiologiques (l'immunité en particulier). D'autres hormones entrent aussi en jeu, comme l'hormone de croissance ayant pour rôle de maintenir un taux de substrats énergétiques suffisant. La glycémie doit au moins se maintenir durant l'effort pour ne pas détériorer la fonction nerveuse, très grande consommatrice de glucose mais dépourvue de réserves. Des moyens sont mis en place pour y arriver : le foie synthétise du glucose (néoglucogénèse) qui est libéré dans la circulation grâce au glucagon (provenant du pancréas). Les muscles pour ne pas faire chuter la glycémie se tournent vers d'autres sources de substrats, à savoir les lipides et plus rarement les acides gras ou aminés (lipolyse, protéolyse). Dans le même temps, l'aldostérone (hormone minéralocorticoïde sécrétée par les surrénales) permet une rétention d'eau et de sodium dans l'organisme (au détriment d'une perte de potassium) [BARTOLAMI, 2015].

Puis l'étape d'épuisement se produit quand la durée du stress est telle qu'il y a épuisement des stocks énergétiques. Une fois que les derniers substrats disponibles (les lipides) arrivent à un seuil critique (moins de 50% des réserves initiales), les fonctions corporelles s'arrêtent. Des dommages sont causés sur les structures corporelles. L'activité générale diminue et s'arrête, l'équilibre de la balance électrolytique est rompu. L'aldostérone libérée en phase de résistance, permettant au corps de maintenir un taux de sodium et

d'hydratation correct entraîne une chute trop importante de la kaliémie amenant à un arrêt cardiaque. C'est une étape qui peut conduire à la mort de l'individu [BARTOLAMI, 2015] [RIPPETOE ET BAKER, 2013].

Extrapoler cette théorie avec l'entraînement du sportif et le phénomène de surcompensation permet de comprendre grossièrement la physiologie générale de l'effort. La limite est liée du fait de son caractère global car chaque activité définit en plus des modifications spécifiques et de nature différente.

b. Adaptations spécifiques et leur nature

Les adaptations peuvent également être spécifiques. Il est évident que le sport pratiqué entraînera des réactions et des modifications distinctes. Le corps humain répond à une logique imposée par le type d'activité réalisée. Les systèmes de commandes, les organes effecteurs, les substrats et les filières énergétiques requis seront différents en fonction du sport. Un exemple marquant est celui opposant les athlètes de fond et les athlètes de force ou d'explosivité. L'observation des caractéristiques physiques d'un marathonien et d'un lanceur de poids par exemple, traduit l'évidence de ce principe. Dans la même optique, les traumatismes et les lésions engendrées peuvent également différer d'un sport à l'autre.

La nature de ces changements est diverse. Les caractéristiques fonctionnelles peuvent s'améliorer comme l'utilisation des systèmes de commande et de régulation (le système nerveux, le système endocrinien). L'entraînement et la récupération amélioreront les capacités d'acheminement des informations, les signaux eux-mêmes ainsi que les cellules réceptrices (recrutement nerveux, quantités d'hormones et sensibilités des cellules cibles). Les adaptations peuvent être structurelles ou morphologiques en renforçant les organes effecteurs et de supports. L'entraînement et la récupération optimiseront le fonctionnement global des organes qui s'en retrouvera amélioré. Par exemple, le muscle peut s'hypertrophier afin de se contracter de manière plus importante, il peut également se munir de réserves de substrats plus importantes et les utiliser de manière plus efficace [KENNEY, WILMORE ET COSTILL, 2013].

B. L'entraînement en force athlétique et sa périodisation

L'objectif de l'entraînement en FA est l'amélioration des résultats du sportif sur les mouvements qui constituent ce sport. Afin d'y arriver, il faut développer sa force maximale, maîtriser les techniques d'exécutions, renforcer l'ensemble des structures corporelles. La nature et l'intensité des sollicitations doivent aller dans ce sens. Soulever quasi

quotidiennement de milliers de kilogrammes dans le but de développer cette capacité physique est une tâche épuisante nerveusement et physiquement. C'est un travail de longue haleine où les progrès d'années en années deviennent de plus en plus durs à obtenir. S'entraîner de manière intelligente avec un programme construit, adapté à soi et à ses objectifs, est donc capital. Cependant, il n'existe pas de méthode universelle et applicable par tous, seulement des principes de bases et des notions qu'il convient de respecter et d'adapter. Les lignes directrices présentées par la suite sont le résultat de travaux de spécialistes du sport reposant sur des dizaines d'années d'observations pratiques, étayées au besoin par des études scientifiques. Je n'ai pas la prétention de fournir un programme idéal et directement applicable, mais simplement d'en poser les bases.

1. Les bases de l'entraînement de la force athlétique

La spécificité de la FA réside dans le développement des systèmes corporels amenant à davantage de force. Cette optimisation est principalement d'origine musculaire et nerveuse. Pour y arriver, il faut exercer une tension importante sur l'organisme. Il est également nécessaire de varier l'intensité et le volume de travail car les adaptations nerveuses et musculaires ne s'installent pas avec les mêmes stimulations. Il est possible de poser la règle principale : pour s'améliorer il faut s'entraîner avec de lourdes charges ce qui conduit implicitement à une durée d'effort réduite [RIPPETOE ET BAKER, 2013].

Trois méthodes permettent de développer la force et servent pour la planification d'un programme. La première est dite méthode des efforts maximaux où l'athlète utilise des résistances proches de son maximum. Ensuite, il y a la technique dite des répétitions, les charges sont moins élevées mais le nombre de répétitions et donc le volume de travail sont importants. Enfin, la méthode des efforts dynamiques repose sur une vitesse d'exécution importante. Chacune d'entre elles permet de développer certaines caractéristiques (musculaires, nerveuses) liées à la force et présente des avantages et des inconvénients. L'athlète peut se servir des trois selon le cycle dans lequel il se situe [COMETTI, 2005].

a. Choix des exercices et leurs répartitions

Pour être performant, il faut construire son programme en planifiant les séances d'entraînement autour des trois grands exercices de la discipline. L'athlète doit pratiquer la flexion de jambes, le soulevé de terre et le développé couché. En dehors du fait qu'ils possèdent une application concrète en compétition, ce sont des mouvements poly-articulaires. De ce fait, ils sollicitent un maximum de groupes musculaires et donc ce sont les plus à même d'entraîner des gains de force. L'exécution doit se faire avec des charges lourdes voir très lourdes et être réalisée par rapport aux exigences en vigueur (amplitude de

mouvement, respect des positions). Deux choses sont attendues : une aisance technique supérieure et une amélioration de la force.

A ces mouvements de base, il convient d'ajouter des exercices dits d'assistance qui viennent compléter le panel d'outils à disposition du sportif. Il peut s'agir de variations des exercices de bases ainsi que de mouvements en lien avec l'objectif du sportif qui est d'améliorer des zones musculaires faisant défaut lors de l'exécution d'un des trois exercices (exemple des muscles synergistes, stabilisateurs ou antagonistes). Ce renforcement et ce rééquilibrage des masses musculaires amélioreront la performance et la stabilité lors du mouvement de base et seront nécessaires en prophylaxie des blessures. Ils sont nombreux car l'athlète se doit d'être le plus complet. Pour la flexion de jambe, du *front* ou *pause squat* peuvent être utile. De même, les *hip thrusts* permettent de renforcer les fessiers. Pour le développé couché, les sportifs peuvent mettre l'accent sur les triceps (barre au front, *dips*) ou sur le deltoïde antérieur avec du développé militaire. Une variation du développé comme l'exercice dit de *spoto press* permet de renforcer les pectoraux. Pour le soulevé de terre, l'athlète peut ressentir la nécessité de renforcer sa zone abdominale par des séances de gainage, de *crunch*. Il peut également améliorer ses muscles lombaires par des relevés de buste sur banc, ses muscles du dos avec du *rowing* buste penché ou encore des séances de rameur [DELAVIER ET GUNDILL, 2010] [VOUILLOT, 2000].

b. Techniques d'entraînements : répartition des exercices

Les athlètes répartissent les exercices différemment au cours de la semaine en fonction de leurs ressentis et du programme élaboré. Il est possible de ne pratiquer qu'un mouvement de base par séance ou d'en regrouper deux ou trois. Certains séparent les séances en fonction de la localisation des muscles travaillés. Des séances « bas du corps » seront composées de flexions de jambes et de soulevés de terre. A l'inverse, des séances « haut du corps » s'orienteront sur le développé couché. Par contre, une méthode d'entraînement dite en *bro-split* caractérisée par le travail d'un groupe musculaire unique au cours d'une seule séance hebdomadaire semble contre-productive. C'est une méthode fréquemment utilisée en musculation mais qui n'a que peu d'intérêt en FA. Pourquoi attendre une semaine avant de re-solliciter un groupe musculaire sachant que la récupération de ce dit muscle s'effectue dans un laps de temps beaucoup plus court [RIPPETOE ET BAKER, 2013].

c. L'intensité et le volume de travail

Lors de la partie consacrée à la périodisation, il a été montré que l'intensité et le volume de travail représentent des variables d'entraînement qu'il est possible et même nécessaire de modifier afin d'apporter des adaptations précises.

En FA, l'intensité d'un mouvement est proportionnelle à la charge mise sur la barre. Des entraînements à haute intensité signifient que le sportif réalise les mouvements avec des poids proches de ses capacités maximales. Dans ce cas, le nombre d'exécutions est réduit [SCHOENFELD, 2010].

La répétition est en lien avec l'intensité car elle correspond au nombre d'exécution à réaliser sans pause pour un mouvement donné. Le sportif adapte toujours le nombre de répétitions à la résistance qu'il souhaite mettre. Pour ce faire, il faut que le compétiteur détermine la charge maximale pour laquelle il peut réaliser une unique répétition et ce sur chaque mouvement. Cette valeur est définie comme étant 1 RM (répétition maximale), c'est la base de référence pour établir un objectif de progression. Le sportif définit ainsi la RM théorique qu'il veut atteindre à la fin de son cycle.

$$\text{Intensité (\%)} = (\text{Charge moyenne utilisée (kg)} / 1 \text{ RM (kg)}) \times 100$$

Par exemple, le compétiteur a une 1 RM au développé couché à 120 kg. Il souhaite obtenir une progression de 20 kg sur son cycle, sa RM théorique sera donc de 140 kg. Lorsqu'il établira son cycle de progression en pourcentage, il calculera la charge à employer à chaque séance et pour chaque exercice à partir de cette valeur. Au fur et à mesure des entraînements, il lui sera nécessaire d'augmenter progressivement les charges (notion de surcharge ou *overload*).

Il est possible de déterminer trois niveaux d'intensité différents. Le nombre de répétitions est inversement proportionnel à la résistance employée. Plus le poids maximal que l'athlète peut soulever est approché, plus ce nombre est réduit. A partir de différentes études, la littérature sportive établit une classification d'intensité de l'effort mettant en corrélation le nombre de répétition qu'il est possible d'effectuer pour une charge donnée à partir d'un pourcentage de la 1 RM [SCHOENFELD, 2010] :

Elevée :	85 à 100% de la RM	1 à 5 répétitions
Intermédiaire :	70-80% de la RM	6 à 12 répétitions
Basse :	<70% de la RM	>15 répétitions

Appliquer un niveau fixe d'intensité pour chaque mouvement ne marche pas, il faut faire varier les répétitions et donc la charge pour obtenir des adaptations différentes (Figure 10). L'entraînement à chaque palier d'intensité conduit à des optimisations sur la force par le biais d'adaptations biologiques spécifiques [MAITRE, 2013].

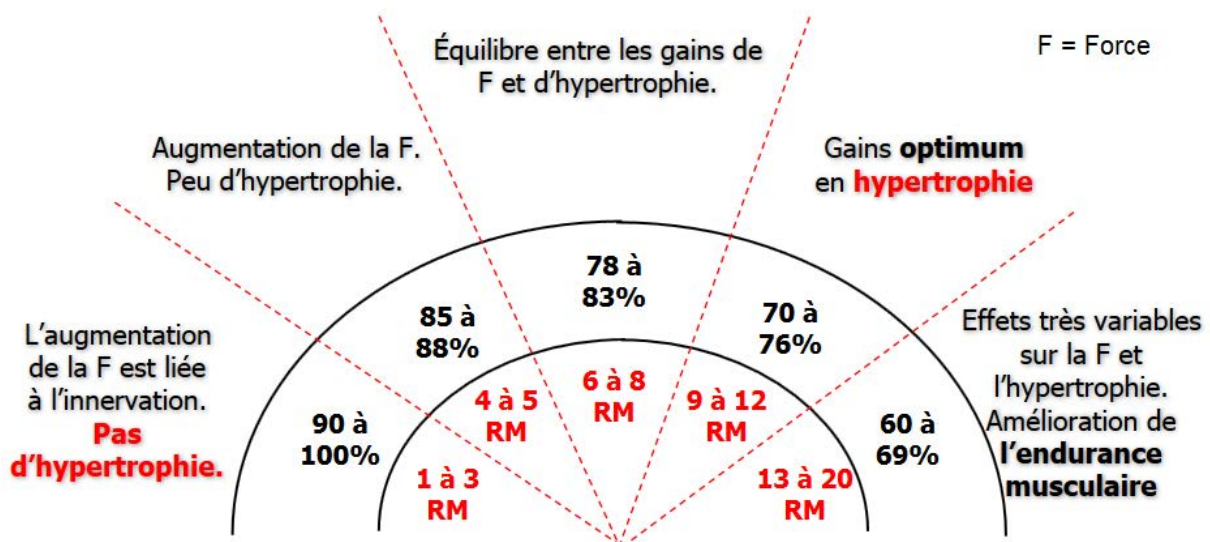


Figure 10. Effets induits par l'intensité de travail [MAITRE, 2013]

Le volume de travail correspond à la quantité d'effort fournie au cours d'une séance. Il est dépendant des répétitions, des séries et du nombre d'exercices réalisés.

$$\text{Volume} = \text{Nombre de répétitions par série}_{x+y} \times \text{Charge employée}_{x+y}$$

Un faible volume de travail sous-entend une intensité élevée avec peu de répétitions, d'exercices, de séries. A contrario, un volume de travail important signifie des charges moins lourdes mais plus de répétitions, de séries et d'exercices.

Les séries correspondent aux nombres de cycles de répétitions que le sportif exécute pour chaque mouvement. Cette donnée couplée avec les répétitions et le nombre d'exercices d'une séance définit donc un volume de travail. Pour engendrer des adaptations, l'entraînement doit provoquer un stress métabolique, des traumatismes. Cela n'est atteignable que par la réalisation d'un minimum de série, où la valeur minimale est fixée à trois. Attention cependant à ne pas inclure les séries d'échauffement dans ce processus.

D'une série à l'autre le poids appliqué et la difficulté de l'exercice peuvent évoluer ou rester stable. Une série est dite conventionnelle quand les deux facteurs, charge et répétition, sont stables. Elle est dite pyramidale progressive quand la charge augmente et le nombre de répétitions diminue d'une série à l'autre. Dans le cas contraire, il s'agit d'un exercice réalisé en pyramidale dégressive. Pour finir, quand le sportif enchaîne ces deux variantes, il pratique du pyramidal complet [RIPPETOE ET BAKER, 2013].

Des séries de travail à une intensité oscillant entre 65 et 80% de la RM, comportant de 8 à 12 répétitions sont bénéfiques pour l'hypertrophie musculaire. Classiquement, un mouvement pour la prise de muscle est pratiqué en 4 X 8-12 (4 séries de 8 à 12 répétitions). Cela définit un volume de travail important. A l'inverse, des séries plus courtes d'1 à 5

répétitions avec une intensité haute de 85 à 100% de la RM impactent les facteurs nerveux de la force. Le format le plus connu étant le 5 X 5 (5 séries de 5 répétitions) avec un volume réduit [DELAVIER ET GUNDILL, 2010] [RIPPETOE ET BAKER, 2013].

d. Autres paramètres

Le temps de pause est une variable d'entraînement qui est fonction de l'intensité ainsi que du type d'exercice et des muscles sollicités. Pour un travail à intensité élevée ayant pour but l'amélioration nerveuse de la force, le temps de repos devra être long. Plus l'athlète se rapproche de la charge maximale, plus la fatigue nerveuse, musculaire ainsi que le risque de blessures sont importants. C'est pourquoi il faut compter un minimum de 3 minutes de repos entre chaque série. Pour des efforts intermédiaires axés sur l'hypertrophie, 1 à 2 minutes suffisent. Ce temps de repos est calculé pour permettre une reconstitution des stocks énergétiques (le phosphate de créatine principalement) [DELAVIER ET GUNDILL, 2010].

Le temps sous tension correspond à la durée pendant laquelle le muscle est actif. C'est un paramètre important car il favorise l'hypertrophie. Certains pratiquants préfèrent se référer à ce critère de temps sous tension plutôt qu'au nombre de répétitions. Lors des exercices à intensité intermédiaire (65 à 80%), ils vont chercher à réaliser des séries ayant une durée précise (par exemple 30 ou 40 secondes) [DELAVIER ET GUNDILL, 2010]. Le temps sous tension est aussi à prendre en compte dans des séries plus intenses de développé couché et de flexion de jambes. Ces deux mouvements possèdent une phase excentrique et une phase concentrique. Ce qui peut poser problème, ce sont les tensions maximales qui s'exercent sur le muscle lors des phases négatives. C'est pourquoi même des courtes séries sont très éprouvantes et peuvent être la cause de blessures. Ce fait justifie encore plus le rôle de l'échauffement, des temps de repos importants et des phases de récupérations entre les séances.

L'ordre des exercices a aussi son importance. Une séance commence obligatoirement par un échauffement. Il minimise le risque de blessures et améliore la force en préparant l'organisme à l'effort intense qui va suivre (augmentation de la fréquence cardio-respiratoire, renforcement articulaire, meilleure coordination et plus grande vigilance). Là encore, il n'y a pas de méthode universelle. Il peut se composer d'un échauffement général sur le plan cardio-vasculaire suivi d'une phase plus spécifique via des automassages ainsi que d'étirements dynamiques. Cet échauffement local est primordial car il permet de préparer tous les muscles impliqués lors de l'exercice (augmentation de la vascularisation ; meilleur apport en dioxygène et en nutriments ; meilleure élimination des déchets issus de leur fonctionnement), d'augmenter sa mobilité. L'objectif est d'exécuter des exercices spécifiques pour chaque muscle afin de les préparer sans pour autant les fatiguer (exemple des lombaires, abdominaux, mollets, ischio-jambiers et quadriceps avant d'entamer des

flexions de jambes). L'échauffement se conclut en réalisant le mouvement de base à vide et en montant progressivement les charges jusqu'à atteindre son objectif de séance.

Concernant les étirements statiques, le fait de les effectuer à froid en début de séance est contre-productif. Il n'est pas nécessaire de les inclure lors de l'échauffement. D'une part en étirant les muscles et les tendons, leur raideur est diminuée donc le complexe restituera moins d'énergie élastique. D'autre part, ils peuvent provoquer un refroidissement du corps (l'inverse du but recherché) et des lésions musculaires. L'intérêt des étirements statiques se situe surtout en dehors des séances car ils permettent d'augmenter la souplesse des personnes qui présentent des difficultés à ce niveau. Ainsi, l'effet à long terme est différent car être trop raide perturbe l'exécution du mouvement (mauvaise amplitude) et peut déclencher des mécanismes de protections musculaires via les différents réflexes. Les structures sensibles du muscle (trop sensible du fait de la raideur) peuvent être à l'origine de stimulations qui parasitent la contraction du muscle agoniste [RIPPETOE ET BAKER, 2013]. Une fois échauffé, il faut commencer par l'exercice le plus éprouvant physiquement et nerveusement. Si la séance ne comporte qu'un seul mouvement de base, il faut débiter par lui et enchaîner ensuite avec des exercices secondaires et d'assistance. Si la séance à intensité élevée comporte deux ou trois mouvements de bases, il est judicieux de commencer par la flexion de jambes. Si des exercices secondaires sont prévus, ils doivent là encore clôturer la séance.

Quelques minutes de cardio-training à intensité réduite en fin de séance peuvent être une bonne solution pour entamer la phase de récupération.

La fréquence des séances ou le nombre de séances par microcycle (qui correspond en général à une semaine) dépend du programme que suit le sportif. En règle générale, il varie de 3 à 5 (lorsqu'il y a 5 séances par semaines toutes ne se font pas en intensité élevée). En deçà, l'organisme ne subira pas assez de stress pour progresser, au-delà il risque de se fatiguer. Les séances ne seront pas identiques d'une journée à l'autre. Ainsi l'intensité et le volume de travail varieront permettant à l'athlète de travailler sur plusieurs axes : le gain de force par les adaptations nerveuses, musculaires, la technique d'exécution, l'explosivité, la souplesse. Un nombre idéal de séances permettra de provoquer le maximum d'adaptations tout en permettant une bonne récupération et en minimisant les risques de blessures et de fatigue [SCHOENFELD, 2010]. La répartition des séances d'entraînement sur la semaine (qui correspond la plupart du temps à un microcycle) dépend des exercices de base qui composent les séances. La récupération ne suit pas le même chemin de progression que la force. Il faut essayer de rester sobre et de limiter à 3 les séances à très haute intensité (par exemple les lundis, mercredis et vendredis). Espacer les séances sollicitant les mêmes groupes musculaires est une possibilité pour bien récupérer [VOUILLOT, 2000].

2. La périodisation : planifier son cycle de progression

L'objectif en planifiant son entraînement est que l'athlète se présente dans les meilleures conditions le jour voulu. Pour ce faire, il faut programmer à l'avance les séances et leur contenu. Ce sont surtout les charges de travail qui nécessitent d'être calculées.

Tout d'abord, le niveau global du sportif détermine la complexité et l'organisation des entraînements. De l'athlète novice en passant par l'intermédiaire jusqu'à l'avancé, les critères de progression vont différer. Ce qu'il faut retenir, c'est que plus il y a d'années de pratiques derrière soi, plus il devient difficile de progresser. Les kilogrammes gagnés sur le total se font au prix d'un investissement et d'une gestion plus importants. La gestion du programme peut devenir plus complexe (suivre des cycles de progression en % de la RM théorique par exemple) surtout au niveau des périodes de récupération. A l'inverse, la marge de progression d'un novice est importante. Il n'est pas rare d'observer des progrès assez élevés durant les premières années de pratiques. Un programme de force pour novice peut se faire comme pour un avancé, cependant il peut rester simple et reposer sur des bases communes. Par exemple, des séances à haute intensité peuvent reposer sur du classique 5 X 5 ou du 3 X 3.

Ensuite, les objectifs réalistes que l'athlète se fixe et le temps dont il dispose pour les atteindre sont également des bases pour établir un cycle d'entraînement. Les règles générales de la périodisation fournies lors de la partie précédente peuvent être appliquées à la pratique de la FA. Un cycle de force (correspondant à un macrocycle) peut être divisé en 3 à 4 phases (mésocycles) de durées variables. Il est utile de commencer par une période préparatoire à fort volume de travail et à intensité intermédiaire (65-75%). L'objectif est d'améliorer les techniques d'exécutions et d'acquérir ou de réacquérir une bonne condition musculaire. Comme les charges de travail sont moindres, l'exécution des exercices d'assistance peut s'avérer extrêmement utile pour renforcer des zones musculaires faibles. L'intensité va progressivement augmenter (de 80 à 95%) et le volume diminuer lors de la phase d'intensification ou précompétitive. L'objectif est d'améliorer les facteurs nerveux de la force. L'athlète doit se focaliser sur les 3 mouvements de bases, alors si une séance est très intense, les exercices secondaires peuvent être mis de côté. Le poids à mettre s'intensifie de microcycle en microcycle pour arriver à des résistances proches du maximum. Puis, il y a la période de compétition, l'intensité stagne ou diminue légèrement (90%). Le but est de maintenir la condition physique mais de ne pas se fatiguer inutilement. Les périodes de récupérations peuvent être plus longues et le volume réduit (il est possible de supprimer les exercices secondaires). Quelques jours de repos peuvent être pris avant le jour de la compétition. Après cette épreuve, le sportif peut entrer dans une période dite hors saison où l'accent peut être mis sur du travail foncier (plus de volume avec des exercices de musculation) ou reprendre sur un cycle classique [VOUILLOT, 2000].

La FA reste un sport minoritaire en France, beaucoup de sportifs ne sont pas forcément encadrés par des entraîneurs. Pour progresser de manière intelligente, écouter les conseils de sportifs ayant plus d'expériences, lire des ouvrages spécialisés et suivre les programmes que mettent en place des entraîneurs qualifiés peuvent être des bonnes solutions. Il est possible de citer quelques-uns d'entre eux : Marc Vouillot, Ed Coan, Mark Rippetoe, Bill Starr, Stéphane Hergott et Remi Pronier entre autres.

C. Amélioration de la force : les adaptations induites

Les adaptations biologiques amenant à des gains de forces ont été évoquées précédemment. Cette partie sera l'occasion de démontrer quelles sont les modifications corporelles résultantes d'un entraînement de force. Elle permettra également de les mettre en relations avec les performances sportives. Il s'agit ici d'étudier des changements se mettant en place dans le temps, c'est-à-dire les adaptations chroniques.

Les adaptations structurales se produisant au niveau du muscle et au niveau du système musculo-tendineux. Le muscle est une structure présentant une plasticité qui se modifie suivant deux processus. Premièrement, la répétition de l'effort de force induit une augmentation de la masse musculaire : c'est l'hypertrophie musculaire. Cette adaptation apparaît quelques semaines après le début d'un programme. Ensuite, l'architecture des muscles soumis à l'effort va se modifier.

Chronologiquement, ce sont les adaptations nerveuses de l'effort de force qui se mettent en place en premier. Dans l'esprit collectif, la force est associée à des muscles volumineux, mais il est nécessaire de rappeler que les facteurs musculaires ne sont pas les seuls responsables. Chez un athlète débutant, les progrès se font sentir bien avant une quelconque hypertrophie. L'aspect nerveux est primordial, tant au niveau du recrutement des fibres nerveuses, qu'à la synchronisation des unités motrices (UM) ou encore à la coordination intermusculaire [RIPPETOE ET BAKER, 2013] [SALE, 1988].

1. Adaptations structurales

a. Effets sur la masse musculaire : l'hypertrophie

Pour la plupart des individus des muscles très volumineux sont forcément associés à la force et vice versa. En réalité, c'est un peu plus complexe car avant même que la structure musculaire ne se modifie, le sportif voit ses résultats s'améliorer. C'est expliqué par le fait que les adaptations fonctionnelles nerveuses se mettent en place bien plus rapidement que l'hypertrophie [SCHOENFELD, 2010]. Ainsi, ce n'est qu'après quelques semaines de sollicitations que les adaptations musculo-tendineuses deviennent fonctionnelles.

De nombreuses études montrent le lien existant entre l'entraînement de force, des améliorations de force et l'hypertrophie musculaire correspondante. Les principes d'expérimentations sont souvent les mêmes. Les scientifiques comparent différents paramètres physiologiques et anatomiques de groupes d'individus avant et après que ces derniers aient été soumis à une période d'entraînement de force. Ils analysent ensuite les résultats et les rapportent aux évolutions de la force acquise. La problématique qui peut survenir est qu'il est nécessaire de distinguer les gains de force obtenus par l'évolution de la masse musculaire et ceux provenant d'autres adaptations (surtout nerveuses). Pour ce faire, certaines études ont mesuré les progrès de force réalisés via des contractions électro-induites (dépendantes uniquement du muscle) et les ont comparés à ceux obtenus lors de contractions maximales volontaires [DUCHATEAU, SEMMLER ET ENOKA, 2006]. Des différences entre les deux existent, prouvant de ce fait que chaque type d'adaptation (musculaire et nerveuse) conduit à une amélioration de cette capacité physique.

Aagaard et Anderson ont réalisé une étude sur un groupe de 11 hommes ayant suivi un entraînement de force. Le programme a duré 14 semaines et il a été axé sur le développement musculaire des membres inférieurs : 38 séances ont été effectuées en comportant des exercices comme du *hack squat*, de la presse à cuisses inclinée, du *leg extension* et du *leg curl*. Chaque exercice a été effectué en intensité élevée et/ou intermédiaire (charges aux alentours de 70% de la force maximale). Chaque mouvement comportait de 4 à 5 séries avec un nombre de répétitions variant de 3 à 12. Différents critères ont été analysés avant et après cette période d'entraînement comme la surface transversale et le volume de section anatomique du quadriceps droit fémoral, et la force développée lors d'un régime isométrique volontaire. La force de contraction maximale isométrique du quadriceps a augmenté en moyenne de 16%. La surface de section transversale anatomique de ce même quadriceps a augmenté de 10% (la mesure a été réalisée par IRM). Un résultat comparable a été observé concernant son volume musculaire [AAGAARD ET ANDERSEN, 2001].

Des mécanismes d'adaptation se mettent en place suite à l'entraînement de force. Il résulte de ces processus, un anabolisme au sein de la cellule musculaire qui augmente. Il devient de fait supérieur au catabolisme. Là est l'origine du processus amenant à l'hypertrophie. Cette synthèse protéique accrue et les divers changements se déroulant dans le muscle apparaissent en réponse aux tensions mécaniques, aux dommages musculaires, au stress métabolique (hormones) provoqués par la pratique de ce sport et à l'alimentation (apport au sein de la cellule d'acides aminés en post entraînement). Les tensions générées par l'exercice stimulent des mécano-récepteurs situés sur les fibres musculaires et induisent une cascade de réactions amenant à une plus forte transcription de la partie des gènes codant pour la fabrication du matériel contractile. C'est un mécanisme qui possède un coût

énergétique et qui demande à la cellule d'avoir à disposition un *pool* d'acides aminés (AA) suffisant. Quand une personne pratique un sport de force, l'organisme continue de « brûler » des calories même après l'arrêt de l'effort [SCHOENFELD, 2010].

Les tensions, les dommages musculaires, tout comme les baisses des réserves énergétiques, l'accumulation de lactates sont autant de facteurs qui conduisent à une réponse hormonale spécifique : une augmentation de la sécrétion hormonale, des liaisons aux protéines de transport aboutissant à des taux d'hormones biologiquement actives supérieures, une clairance hépatique modifiée, une affinité aux récepteurs hormonaux différente... Quoi qu'il en soit, l'entraînement de la force entraîne l'augmentation des activités de plusieurs hormones anaboliques favorisant grandement l'hypertrophie sur le long terme. Quatre principales hormones anaboliques entrent en jeu : la testostérone, l'hormone de croissance (GH) (qui augmente pendant et 30 minutes après l'effort), l'*insulin growth factor* (IGF)-1 et l'insuline [KOMI, 2003] [SCHOENFELD, 2010]. L'entraînement de la force conduit à une élévation des taux sanguins de cortisol, qui présente une activité catabolique. Afin de permettre à l'organisme de se développer, il faut limiter au maximum l'impact négatif que peut avoir le cortisol pendant la phase de récupération. L'alimentation joue un rôle primordial dans la régulation de son taux et dans ceux des hormones anaboliques. Il est à noter que l'entraînement en résistance n'engendre aucune modification sur les niveaux hormonaux, sur le long terme.

L'hydratation cellulaire est un facteur d'hypertrophie. La présence d'eau agit comme un régulateur physiologique de la fonction cellulaire. L'augmentation de la quantité d'eau à l'intérieur de la cellule provoque une plus grande pression sur sa membrane. C'est un signal d'alarme qui la pousse à se renforcer (voie de signalisation des protéines kinase). L'entraînement de la force peut conduire à une accumulation de lactates et à de plus grands stocks de glycogène. Ces deux phénomènes conduisent à une modification osmotique favorable à une hydratation intracellulaire. D'autres facteurs contribuent à l'hypertrophie comme la fatigue ou une hypoxie locale [SCHOENFELD, 2010].

L'hypertrophie au sein des muscles se constate à plusieurs niveaux. D'une part, il y a une augmentation du nombre de sarcomères en parallèle (addition d'unités contractiles en périphérie) : l'hypertrophie myofibrillaire. D'autre part, le volume du sarcoplasme de ces cellules augmente : l'hypertrophie sarcoplasmique. Naturellement les tissus conjonctifs (collagène et autres tissus) entourant les fibres musculaires suivent leur évolution. L'espace occupé dans le muscle par ces tissus (13%) reste stable peu importe le volume et la taille de la structure [KOMI, 2003] [SCHOENFELD, 2010].

b. Effet sur l'architecture musculaire avec la pennation des fibres

L'hypertrophie n'est pas la seule modification musculaire résultante de l'entraînement de force. La disposition des fibres musculaire est un facteur important sur le développement de force. Les muscles pennés ou penniformes présentent des faisceaux de fibres s'insérant de manière oblique à l'axe de transmission de la force formé par le tendon. Cette disposition donne l'aspect d'une plume, d'où leur nom. L'angle qui résulte de cette disposition est nommé angle de pennation de la fibre. Dans les muscles pennés, plus l'angle formé par les fibres est important plus la surface physiologique l'est. Un muscle penné moins volumineux mais disposant de fibres disposées favorablement peut produire la même force qu'un muscle plus « gros » mais avec des cellules orientées différemment [AAGAARD ET ANDERSEN, 2001].

Un muscle hypertrophié présente des fibres avec un plus grand angle de pennation ayant pour résultat une surface physiologique et donc un développement de force plus grand [KAWAKAMI, ABE ET FUKUNAGA, 1993]. Cependant, une hypertrophie trop marquée et un angle trop important peuvent devenir gênants. Cela peut poser problème dans les muscles ayant une pennation de base très forte comme dans les mollets par exemple. Dans ce type de muscle, à partir d'un certain développement, la composante fonctionnelle de la force ne se développera plus et agira même comme un frein. Des études comparatives entre culturistes et haltérophiles ont confirmé ce fait [IKEGAWA, FUNATO ET TSUNODA, 2008].

c. Effet sur le complexe Muscle Tendon et les facteurs élastique

La composante contractile génératrice de force est agencée avec des éléments élastiques en série. Cette composante est essentielle car elle permet la transmission de la force jusqu'aux segments osseux. Elle est composée d'une fraction active représentée par les éléments élastiques qui relient les myofilaments à l'intérieur même du muscle. Le tendon est la fraction passive de cette composante série.

Des études ont mis en évidence le fait que l'entraînement permettait de modifier ces structures et leurs propriétés visco-élastiques [POUSSON, VAN HOECKE ET GOUBEL, 1990]. Des chercheurs ont observé, chez un panel d'individus suivant un programme de force, l'évolution par échographie de l'allongement des structures tendineuses à la suite de contractions. Ces mesures ont été réalisées au niveau du gastrocnémien médial. Dans des conditions d'entraînement standard, c'est la raideur du tendon qui augmente et l'évolution du volume musculaire est positive, confirmant une hypertrophie. L'augmentation importante de la raideur du tendon (+31%) montre que ses propriétés visco-élastiques sont modifiées mais sans changement en masse et en volume de ce dernier. Les protéines élastiques présentes dans le muscle subissent également des modifications. L'entraînement provoque une augmentation rapide de la quantité de desmine. Cette évolution a lieu rapidement, durant les

toutes premières semaines du programme donc bien avant une hypertrophie. Elle se stabilise ensuite pour atteindre un plateau au bout d'un mois [KUBO, KANEHISA ET FUKUNAGA, 2002].

Un gain de force au niveau musculaire n'est donc pas lié uniquement au développement du matériel contractile. Le muscle par le développement de sa composante élastique active et l'augmentation de la raideur des tendons transmettent et restituent d'une manière plus efficace la tension aux os.

2. Adaptations fonctionnelles nerveuses et neuromusculaires

Même si un athlète possède des systèmes de production et de transmission de la force performants, il doit les faire fonctionner de la manière la plus optimale qui soit. C'est avec l'objectif de soulever des charges toujours plus lourdes que l'organisme par l'intermédiaire de son système nerveux va améliorer ses fonctions et ses relations avec les structures effectrices du mouvement. Ce sont des adaptations qui se mettent en place rapidement et qui résultent de plusieurs mécanismes : un meilleur recrutement des unités motrices (UM) et donc des fibres nerveuses au sein des groupes musculaires, une meilleure synchronisation des contractions, une coordination optimale des groupes musculaires impliqués et une régulation des réflexes [COMETTI, 2009] [LEGEARD ET TEXIER, 2005] [SALE, 1988].

Des chercheurs ont étudié des groupes d'individus soumis à un entraînement de force en mesurant l'évolution et la vitesse d'apparition de différents paramètres physiologiques. Ils ont intégré l'utilisation d'électromyogrammes (de surface le plus souvent ou intramusculaire) afin de mesurer les différences d'activités électriques musculaires avant et après le programme de force. Pour confirmer la part des adaptations nerveuses dans l'amélioration des résultats, ils pouvaient aussi comparer la force mesurée, avant et après entraînement, lors d'une contraction maximale volontaire et lors d'une contraction induite par électrostimulation. Car la différence qui existe entre les deux, est due au système nerveux. Cette étude a montré que les activités électriques augmentent en premier et de manière importante. Cela confirme la part des adaptations nerveuses dans l'amélioration de la force et aussi le fait qu'elles apparaissent bien avant l'hypertrophie musculaire. Un athlète peut donc gagner en performance uniquement grâce à un système nerveux performant et sans évolution musculaire [NACIRI, ROI, LANDONI, 1989].

3. ATTEINDRE SES OBJECTIFS EN S'APPUYANT SUR L'ALIMENTATION

L'alimentation représente, avec le sommeil, le pilier sur lequel reposent la récupération sportive. Une nutrition de qualité conditionnera l'ensemble de la démarche d'amélioration des résultats. L'entraînement, même le plus abouti du monde, ne permettra pas une progression optimale s'il n'est pas accompagné par un programme nutritionnel adéquat.

L'objectif d'une bonne hygiène alimentaire est multiple : être armé énergétiquement pour supporter les entraînements et les compétitions ; combler les déficits énergétiques, hormonaux liés aux phases d'efforts ; optimiser les cycles de récupération afin de soutenir les adaptations induites notamment l'hypertrophie musculaire ; diminuer la fatigue, les risques de surentraînement, de suroxydation et de blessures. Il est nécessaire d'organiser la construction de son programme autour des facteurs que sont les besoins caloriques, l'apport en macronutriments et en micronutriments, la répartition des repas ainsi que des collations. Pour ce faire, il faut y aller par étapes en priorisant les éléments ayant le plus d'impact.

Le premier facteur à prendre en compte est la couverture des besoins nutritionnels de l'individu. Ils définissent les apports alimentaires énergétiques et constitutionnels nécessaires au bon fonctionnement physiologique. Les exigences induites sont quantitatives et qualitatives. L'activité de force et les adaptations qui en résultent, demandent à l'organisme un surplus d'énergie non négligeable. Ne pas tenir compte du total calorique lors de la préparation de son régime alimentaire est une erreur. Le second critère est la répartition des macronutriments. Une fois que le sportif connaît l'apport calorique qu'il doit ingérer, il lui est nécessaire de savoir comment et par quoi composer cet apport. Les protéines, les lipides et les glucides se doivent d'être apportés dans les bonnes proportions. Il est aussi indispensable de traduire ces besoins théoriques en choix alimentaires concrets. Les bases nutritionnelles acquises le lui permettront. Après avoir présenté cet aspect macro-nutritionnel, nous nous intéresserons à l'apport en fibres et en micronutriments. Il est évident que toutes les vitamines, tous les minéraux et oligo-éléments ont leur importance dans la prise en charge globale de l'athlète, néanmoins des choix sont à faire. La pratique de la FA représente un facteur favorisant l'apparition d'un stress oxydant, c'est pourquoi une réponse micro-nutritionnelle alimentaire doit se mettre en place afin de protéger l'organisme. A côté de cela, un point détaillé sera fait sur la vitamine D et le magnésium. Pour finir, quelques règles afin d'établir un plan alimentaire adapté aux objectifs du sportif seront évoquées. Libre à lui d'adapter ses choix alimentaires en fonction de ses exigences. Les préférences alimentaires, les intolérances et allergies, les contraintes de la vie quotidienne et d'autres facteurs (religieux, éthique...) seront autant de critères d'individualisation du régime alimentaire [HELMES, VALDES ET MORGAN, 2015] [TIOLLIER, 2015].

A. Estimer ses besoins nutritionnels, définir ses apports

En France, l'agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, l'ANSES, élabore et rédige des recommandations nutritionnelles : les ANC (apports nutritionnels conseillés). Ils sont fondés sur une démarche scientifique et servent à fournir des repères sur l'alimentation à adopter afin de couvrir les besoins nutritionnels moyen, et ce, pour chaque type de population. L'ANSES évalue aussi l'apport énergétique total quotidien (AETQ) à fournir via l'alimentation pour ces mêmes populations et le quantifie pour chaque macronutriment. Pour illustrer mon propos, l'agence estime que l'AETQ d'un homme actif (70 kg ; entre 20 et 40 ans) se trouve aux alentours de 2500 kcal avec une répartition en macronutriments de cet ordre : 50% de l'énergie doit provenir des glucides, 15% des protéines et 35% des lipides. Dans le cas d'un sportif de FA, ces recommandations ne reflètent ni les besoins spécifiques, ni les bouleversements métaboliques et physiologiques liés à la pratique de cette activité. C'est pourquoi, il est nécessaire de réévaluer l'AETQ, de répartir différemment les macronutriments et d'augmenter les apports en minéraux et vitamines [AFFSA, 2000].

La dépense énergétique journalière (DEJ) est l'énergie utilisée quotidiennement pour vivre. Elle se compose principalement de trois postes de dépenses : le métabolisme de base (MB), la thermogénèse alimentaire (10% de la dépense journalière) et les dépenses liées aux activités. Son estimation repose sur la formule : **DEJ (kcal) = MB X niveau d'activité physique (NAP)** [BLANC, 1997] [PERES, 2016] [VENESSON, 2011].

Avec mes données personnelles (poids = 70 kg, hauteur = 1,75 m, âge = 30 ans, taux de masse grasse 11,5%, masse maigre = 61,95 kg), j'obtiens un DEJ estimé à 2763 kcal [PERES, 2016]. Mes apports devront s'articuler autour de cette valeur indicative et être modulés en fonction de mes objectifs de composition corporelle : stabilisation, gain ou perte de masse.

B. Les macronutriments pour la pratique de la force athlétique

Le nombre de calories étant établi, il est désormais nécessaire de définir comment et avec quoi les apporter. La répartition des macronutriments ne doit pas se faire de manière aléatoire. Certaines bases nutritionnelles sont à connaître afin d'établir des choix alimentaires. Pour rappel, chaque macronutriment apporte une certaine quantité d'énergie une fois ingérée : les protéines = 4 kcal/g ; les glucides = 4 kcal/g ; les lipides = 9 kcal/g ; l'alcool/éthanol = 7 kcal/g. Il est admis que pour un individu normal les glucides doivent représenter 45 à 50% de l'AETQ, les lipides 35 à 40% et les protéines 15%. Cependant pour

les sportifs de force, les cycles d'entraînement-récupération et les adaptations, les obligent à modifier quelque peu ces données de références. L'apport protidique sera augmenté pour équilibrer le bilan azoté et le rendre positif. Des stratégies nutritionnelles visant à favoriser un gain de masse musculaire, une bonne récupération seront aussi évoquées. Elles se traduiront par les choix en macronutriments à faire aux repas et lors de l'entraînement.

1. Les protéines et l'athlète de force athlétique

a. Notions générales sur les protéines et les AA

Un Homme adulte de 70 kg possède en moyenne entre 10 à 12 kg de protéines, 40% sont contenus dans les tissus musculaires, 15% dans des structures comme la peau, les os, le sang, 10% dans des tissus viscéraux [AFSSA, 2007] [CEN, 2010] [CUQ, 2006].

Chez l'Homme, 20 AA protéinogènes constituent la base nécessaire pour la synthèse de l'ensemble des protéines corporelles (en excluant la pyrrolysine et la sélénocystéine). Sur ces 20 AA, il est admis que 9 sont indispensables pour l'Homme : la valine, la leucine, l'isoleucine, la phénylalanine, le tryptophane, la méthionine, l'histidine, la thréonine et la lysine (ces deux derniers AA sont strictement indispensables), auxquels on ajoute l'arginine indispensable uniquement chez l'enfant. Ils sont essentiels car l'organisme est incapable de synthétiser leur squelette carboné. Dans le cas où un AA essentiel fait défaut, l'organisme sera alors fortement limité en termes de protéosynthèse et de croissance musculaire. L'alimentation doit donc permettre un apport suffisant pour l'ensemble de ces 9 AA [EFSA, 2015]. Les AA permettent la formation de protéines mais ils ont également des liens avec des composés non protéiques : neuromédiateurs, hormones non peptidiques, substrats énergétiques, porphyrines, purines. Le renouvellement et le remplacement des structures usées ou devenant non fonctionnelles, la réparation des tissus endommagés, la croissance cellulaire et les pertes en azotes sont autant de rôles qui incombent aux AA ingérés [AFSSA, 2007].

b. Métabolisme général

Après leur assimilation digestive, les protéines sous forme d'AA libres ou de petits peptides entrent dans la circulation portale puis sont captées par le foie afin d'entrer dans diverses voies métaboliques (synthèse protéique, catabolisme oxydatif). Les AA à disposition forment le *pool* d'AA libres de l'organisme (essentiellement intracellulaire). Le foie, les muscles, les reins, l'intestin et le cerveau sont les organes qui régulent ces réactions. La valine, la leucine et l'isoleucine présentent une chaîne ramifiée, ce sont des AA dits branchés ou *BCAA* pour *Branched Chain Amino Acid*. Les *BCAA* passent outre le métabolisme hépatique et rejoignent rapidement la circulation générale et les cellules musculaires.

Le *pool* d'AA contient aux alentours de 70 grammes d'AA. Sa composition est loin d'être fixe car les protéines de l'organisme sont dans un processus de renouvellement permanent. A chaque moment de la journée des réactions de protéosynthèses et de protéolyses ont lieu. Ce va-et-vient des AA définit le cycle protéique ou *turnover*. Lorsque les processus de synthèses sont supérieurs aux dégradations, l'individu se trouve dans un état d'accrétion protéique (ou d'anabolisme). Cet état conduit à un gain de masse musculaire. Lorsque les réactions de protéolyses sont supérieures, l'organisme est en phase catabolique. Quotidiennement chez un adulte, ce sont approximativement 300 grammes de protéines qui sont ainsi dégradés et 300 grammes resynthétisés (à partir du *pool* d'AA). L'alimentation doit venir couvrir les pertes azotées du *pool* d'AA sans quoi l'organisme devra puiser dans ses réserves protéiques (muscles) afin de les compenser (état catabolique entraînant une atrophie musculaire). En prenant en compte les apports dits endogènes qui représentent environ 10% (cellules desquamées, de sécrétions salivaires, gastriques, intestinales), l'alimentation pour un individu sédentaire moyen doit apporter près de 70 grammes de protéines. Chez un adulte de poids moyen, c'est aux alentours de 0,9 g/kg/j [AFSSA, 2007] [CEN, 2010] [EFSA, 2015] [IFN, 1997a].

La balance azotée est un outil qui permet d'estimer la différence entre d'une part les apports protéiques (exogènes essentiellement mais aussi endogènes) et de l'autre les pertes azotés (urinaires, fécales, autres comme la desquamation, sueur). Cette balance peut être assimilée au *turnover* protéique lorsque le *pool* d'AA est stable, ce qui est le cas la plupart du temps. Dans ces conditions, elle permet d'estimer une perte ou un gain de masse musculaire. Les indicateurs qui peuvent modifier cette balance et ce *turn-over* sont nombreux : l'âge, avec un renouvellement accru chez l'enfant puis une diminution progressive ; l'état nutritionnel, un individu dénutri ou à jeun présentera un renouvellement moindre avec une prédominance de la protéolyse, une situation post prandiale favorisera les synthèses ; certaines pathologies et infections, inflammations, brûlures, traumatismes, engendreront un renouvellement exacerbé mais avec une prédominance de la protéolyse ; le mode de vie, l'activité physique et une alimentation adaptée contribueront à un métabolisme supérieure avec une synthèse accrue ; la consommation d'alcool entravera ce phénomène [AFSSA, 2007] [CEN, 2010] [IFN, 1997a].

c. Métabolisme protéique spécifique aux sportifs de force athlétique

Il est de notoriété publique que les sportifs de force consomment de grandes quantités de protéines. Il est nécessaire de comprendre l'impact de l'exercice en résistance sur ce métabolisme et sa relation avec la prise alimentaire afin de pouvoir justifier d'une telle consommation. L'activité sportive en résistance stimule des voies de signalisations et de facilitations de la synthèse des protéines contractiles. Dans les cellules musculaires,

l'activation de mécanorécepteurs ainsi que la libération de facteurs de croissance (IGF-I, insuline) résultant de l'effort, activent des voies de développement. Cette augmentation de synthèse protéique est effective après l'effort et persiste plusieurs heures (jusqu'à 48 heures chez des individus non entraînés). Ce moment est défini par certains comme une fenêtre anabolique. Par contre à l'effort, c'est l'inverse. La diminution de l'ATP, la baisse des stocks de glycogène engendrent une inhibition de ces voies de synthèses (en plus d'une sécrétion de cortisol). Cela engendre un état de sidération de la synthèse avec dans le même temps une élévation des réactions cataboliques de dégradations [AFSSA, 2007] [DREYER, FUJITA, CADENAS *et al.*, 2006].

De très nombreuses études, comme celle de Fujita réalisée en 2007, illustrent le fait que la prise de protéines induit une élévation des synthèses. L'ingestion d'un mélange composé d'AA essentiels (enrichi en leucine à hauteur de 35%) et de glucides a permis d'augmenter de 94% les flux de synthèses protéiques musculaires ou *fractional synthetic rate* (FSR) des individus du groupe ayant consommé ce mélange comparativement aux sujets sans prise alimentaire, seulement une heure après le début du test. La disponibilité des AA et des glucides aux niveaux plasmatique et cellulaire place naturellement l'organisme dans un état très favorable à l'anabolisme et au développement de la masse musculaire. Cette présence est à l'origine d'une sécrétion d'insuline, de GH, d'IGF-1 et d'une stimulation des voies de facilitations de la synthèse protéique [AFSSA, 2007] [FUJITA, DREYER, DRUMMOND *et al.* 2007].

Une prise d'AA autour et pendant l'exercice améliore les performances, optimise les gains de force, amplifie l'effet anabolique post entraînement tout en maintenant une balance azotée positive. Après l'exercice, tout est mis en œuvre afin de favoriser cet état. La présence d'AA essentiels et notamment de leucine au niveau plasmatique à ce moment précis est donc un élément clé. En phase de récupération, les AA sont rapidement transportés dans les fibres musculaires où ils amplifient la stimulation des voies de synthèses protéiques et servent de support de base pour maintenir cette hausse anabolique. Dreyer et ses collaborateurs ont publié, en 2007, une étude qui montre la synergie d'action qui existe entre l'exercice en résistance et l'ingestion en post effort d'un mélange d'AA essentiels et de glucides. Des volontaires ont été séparés en deux groupes. L'exercice en résistance a été identique dans les deux cas, par contre un seul des deux groupes a vu ses membres recevoir une collation (mélange d'AA et de glucides enrichis en leucine) une heure après la fin des exercices. Les FSR ainsi que sur la balance azotée (mesurée à partir des données fournies par la balance nette en phénylalanine) ont été mesurés à différents moments. Les sujets du groupe ayant consommés, une heure après la fin de l'exercice, le mélange composé de 8 AA essentiels (pas de tryptophane mais plus de leucine) et de glucides (saccharose) ont vu leur anabolisme accroître de manière significative. Mais ce qui

est à noter, c'est que la balance azotée est aussi très largement positive par cette synergie d'action. Ces deux facteurs se sont cumulés et ont donc amplifié les signaux cellulaires anaboliques. L'exercice seul, sans prise alimentaire, a conduit à une balance légèrement négative malgré une hausse des FSR. Sans un apport extérieur, les seuls AA disponibles au niveau des fibres pour les réactions de synthèses sont ceux provenant des protéolyses. Tous ne sont pas réutilisés car une partie de ces derniers est oxydée. Il en résulte donc un déséquilibre favorable aux dégradations. Dans le cas inverse, si l'exercice est accompagné d'une prise alimentaire spécifique, les AA libres disponibles au niveau plasmatique sont transportés directement au sein des cellules. C'est cette accumulation post exercice qui place la cellule dans un état favorable aux synthèses car c'est à ce moment là qu'elle présente la plus grande facilité d'utilisation. L'ingestion d'AA spécifiques, comme la leucine, est donc une condition *sine qua none* et le stimuli nécessaire afin d'obtenir une balance azotée positive et l'accroissement de la masse musculaire à la suite d'un effort de force [AFSSA, 2007] [CERMAK, RES, DE GROOT *et al.*, 2012] [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [DREYER, DRUMMOND, PENNINGG *et al.*, 2007] [IFN, 1997a].

Il existe un lien entre la dose de protéines prise et la réponse anabolique obtenue. L'effet est dose dépendant avec une limite à partir de laquelle les FSR semblent ralentir. L'étude de Moore en 2008 montre qu'un apport compris entre 20 et 25 grammes de protéines de qualités, soit approximativement 10 grammes d'AA essentiels, permet en post exercice d'engendrer une stimulation optimale et de maximiser la réaction anabolique. Au-delà de ces valeurs, un plateau se crée signifiant un ralentissement de cette relation dose-réponse. Il semble donc que la limite soit à ce niveau et qu'une prise supérieure à 25 grammes n'engendre pas de stimulus plus important. L'autre conclusion de cette étude est qu'il semble judicieux de répartir la dose quotidienne de protéines en respectant cette prise de 20 à 25 grammes par repas ou collation (le nombre de prises variant en fonction du besoin protéique total). Diminuer le nombre de repas en augmentant la quantité de protéines à chacun d'entre eux ne leur semble pas optimal dans le sens où les AA en excès seront éliminés par oxydation [AFSSA, 2007] [MOORE, ROBINSON, FRY *et al.*, 2008].

Malgré tout, il est nécessaire de relativiser ces chiffres de part certaines conditions expérimentales. Tout d'abord, cette étude ne portait que sur un panel de 6 pratiquants de sport de force. Ensuite, les analyses ont été effectuées après un entraînement à fort volume de travail contenant une majorité de mouvements d'isolations. Le quotidien d'un athlète de FA est différent, nous l'avons vu : mouvements polyarticulaires ; charges libres ; moins de volume mais plus d'intensité dans les charges de travail. C'est pourquoi, même s'il est possible de tirer quelques enseignements pratiques, il est nécessaire d'individualiser la réponse à fournir. Imaginons un sportif de 110kg ayant un besoin protéique quotidien avoisinant les 200 grammes. Il est difficilement concevable de lui conseiller de fractionner

ses apports en 8 prises quotidiennes. En comptant les heures de repos, il devrait dès lors manger toutes les deux heures [DELAVIER ET GUNDILL, 2012].

D'une manière générale, il est important d'avoir une présence d'AA essentiels au niveau plasmatique rapidement après l'effort car c'est à ce moment là que les flux sanguins musculaires ainsi que le transport des AA dans les cellules sont les plus importants. Si la séance est courte (moins d'une heure), le sportif peut avoir cette présence d'AA plasmatique de par une collation prise avant la séance. Dans le cas d'un entraînement plus long sans prise alimentaire préalable, il est recommandé de manger rapidement après la fin de la séance, les meilleures réponses anaboliques étant obtenues dans l'heure qui suit. Une méta analyse de 2013 réalisée par Schoenfeld fait le point sur le lien existant entre le *timing* de l'ingestion de protéines et l'amélioration de la force et de la masse musculaire à la suite d'un programme d'entraînement en résistance. D'après les analyses, une ingestion protéique prise dans un délai d'une heure à trois heures engendre tout de même une réponse positive [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [SCHOENFELD, ARAGON ET KRIEGER, 2013].

d. Les besoins quantitatifs et qualitatifs du sportif de force athlétique

L'athlète de FA doit mettre en place une alimentation riche en protéines car le métabolisme et le *turn-over* de ce macronutriment sont beaucoup plus importants que chez un individu sédentaire. L'ANSES fixe l'apport nutritionnel conseillé (ANC) en protéines à 0,83 g/kg/j chez des individus sédentaires. Pour un athlète se trouvant en période d'entraînement sans objectifs de prise de masse musculaire, elle recommande un apport compris entre 1,3 et 1,5 g/kg/j. En phase de progression centrée sur le gain de masse musculaire, l'ANSES conseille d'augmenter cet apport protéique à 2 g/kg/j (voir à 2,5 g/kg/j). A l'heure actuelle, aucune étude scientifique ne montre de résultats probants pour des athlètes ayant suivi des régimes apportant plus de 3 g/kg/j (plafonnement des synthèses, oxydation des AA en excès). D'autres institutions donnent globalement la même fourchette d'apport : entre 1,5 et 2 g/kg/j. L'ANSES conseille de limiter ces régimes sur des périodes précises [AFSSA, 2007] [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [TARNOPOLSKY, ATKINSON, MACDOUGALL, *et al.*, 1992] [TIOLLIER, 2015].

Sur le plan qualitatif, il est nécessaire que les choix alimentaires du sportif couvrent l'ensemble de ses besoins en AA essentiels (représentant environ 40% des besoins en AA totaux), avec une importance particulière à apporter sur la leucine et les AA ramifiés (Tableau VIII). Pour couvrir ses besoins, l'athlète dispose de l'alimentation classique (pour au moins les deux tiers) ainsi que de l'utilisation de compléments alimentaires de type protéines en poudre. Cette démarche dans la prise de compléments ne doit pas se faire au détriment de l'apport classique, mais en supplément afin de compléter la part restante (un tiers de l'apport). Il est judicieux de diversifier les apports afin de bénéficier des avantages de

chaque source protéique et d'éviter l'accumulation de certains composés potentiellement néfastes [AFFSA, 2007] [DELAVIER ET GUNDILL, 2012].

Tableau VIII. Estimations des besoins en AA indispensables chez l'adulte définis par différentes institutions [AFSSA, 2007]

en mg.kg ⁻¹ .j ⁻¹	FAO/UNU/OMS 1985 (FAO/WHO/UNU, 1985)	ANC 2001 (Martin et al., 2001)	DRI 2002 (FNB/IOM, 2002)	Proposition Afssa
Histidine	8-12	12	11	11
Isoleucine	10	23	15	18
Leucine	14	39	34	39
Valine	10	21	19	18
Lysine	12	30	31	30
AA soufrés	13	15	15	15
AA aromatiques	14	39	27	27
Thréonine	7	15	16	16
Tryptophane	3,5	6	4	4

FAO: Food And Agriculture Organization of the United Nations; UNU: United Nations University
 OMS: Organisation mondiale de la santé / WHO: World Health Organization
 ANC: Apport nutritionnel conseillé; DRI: Dietary Reference Intakes
 FNB: Food and Nutrition Bulletin; IOM: Institute of Medicine
 Afssa: Agence française de sécurité sanitaire des aliments

e. Valeur nutritionnelle des protéines, méthodes d'évaluations

Tous les aliments n'ont pas le même intérêt sur le plan nutritionnel. La qualité est liée au fait que les protéines de l'aliment puissent apporter les AA indispensables dont le corps a besoin et avec le meilleur rendement. Les paramètres qui conditionnent cette valeur sont : l'origine de la protéine (animale, végétale) déterminante pour la composition en AA ; sa structure et ses propriétés physico chimiques générales qui impactent la digestibilité, la vitesse d'absorption et la biodisponibilité ; la présence de composés antinutritionnels pouvant diminuer la biodisponibilité d'autres nutriments ; et d'autres éléments comme l'allergénicité, une éventuelle toxicité [AFSSA, 2007] [IFN, 1997a].

Méthodes biologiques : disponibilité métabolique des AA

Le coefficient d'efficacité protéique (CEP) est un outil intéressant pour comparer la valeur de plusieurs aliments mais il présente des défauts. Si un produit présente des lacunes dans sa composition protéique, il ne permet pas de déterminer l'origine du ou des facteurs limitants. Il y a également le problème lié à l'extrapolation des résultats chez l'homme (l'origine de la technique repose sur l'utilisation de rats) car les besoins en AA entre les deux espèces ne sont évidemment pas les mêmes. Pour finir, le CEP est limité à des études sur des aliments contenant au moins 1,80% d'azote.

CEP= gain de poids (en g/j) / Quantité de protéines ingérées (en g/j)

Le coefficient d'utilisation digestive (CUD) mesure le degré d'assimilation et la capacité d'une protéine à être absorbée au niveau digestif. Il suffit de connaître les quantités d'azote (N) ingérées et celles rejetées dans les selles via la collecte d'échantillons. Le problème est que cette formule ne tient pas compte des pertes endogènes de l'organisme car l'azote rejeté dans les selles provient non seulement des protéines non digérées mais aussi de pertes endogènes (déchet du métabolisme des bactéries présent dans le côlon, cellules desquamées...). Le CUD standardisé corrige cela.

CUD apparent = (N absorbé/ N ingéré) X 100 = [(N ingéré – N rejeté) / N ingéré] X 100

CUD standardisé (réel) = [N ingérée–(N fécal total – N fécal endogène)/N ingérée] X 100

La valeur biologique (VB) représente la capacité d'une protéine à fournir les AA qu'il contient pour la synthèse protéique. Il représente donc la quantité d'azote réellement utilisée au niveau de la cellule et sa facilité d'utilisation par l'organisme. Plus cette valeur est haute, plus la qualité globale de la protéine alimentaire est forte et inversement. A noter que la mesure se fait uniquement sur l'azote absorbé donc après assimilation digestive, la digestibilité n'est donc pas prise en compte.

VB = (N retenu dans les cellules / N absorbé) X 100

L'utilisation protéique nette (UPN ou NPU pour *Net Protein Utilization*) fait la synthèse entre le CUD et la VB. Cette mesure tient donc compte de la digestibilité de la protéine et de sa capacité à être utilisée par l'organisme.

UPN = (CUD X VB) / 100 = (N retenu dans les cellules / N ingéré) X 100

Toutes ces méthodes présentent des imprécisions car la plupart ne tiennent pas compte de certains facteurs pouvant faire varier le bilan azoté. C'est pourquoi des méthodes chimiques semblent plus indiquées [AFSSA, 2007] [FAO, 2011].

Méthodes chimiques : composition en AA indispensables

L'indice chimique (IC) permet de connaître la composition en AA indispensables d'une protéine donc son aminogramme. Cette mesure est essentielle car, grâce à elle, il est possible d'estimer la capacité de la source alimentaire à satisfaire aux besoins en AA indispensables d'un individu. C'est une mesure rapide et plus économique que les méthodes biologiques. Pour ce faire, il faut comparer la composition en AA indispensables de l'aliment à analyser avec celle d'une protéine de référence (anciennement l'œuf), la *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) et l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) utilisent aujourd'hui un autre profil. Les rapports obtenus sont exprimés en

pourcentage et c'est la valeur du plus faible pourcentage qui détermine l'IC de la source protéique (digestibilité non prise en compte).

$$\text{IC} = (\text{quantité d'un AA indispensable par g de la protéine étudiée} / \text{quantité d'un AA indispensable par g de la protéine de référence}) \times 100$$

L'indice corrigé de la digestibilité, PD-CAAS pour *Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score*, corrige l'IC par le fait que le facteur digestif est pris en compte. Cette mesure est considérée, par l'ANSES, comme l'indice de référence pour juger de la qualité protéique d'un aliment. Plus il est élevé, plus la protéine a une composition en AA essentiels correspondant aux critères de référence et une bonne digestibilité. Cet indice corrigé peut être supérieur à 100, si l'aliment présente des teneurs en AA au-delà de celles contenues dans la protéine de référence. En dessous, cela signifie que la composition présente un ou plusieurs AA limitants et/ou une mauvaise digestibilité. Lors de son étude de 1991, la FAO a rapporté à 100 toutes les valeurs qui dépassaient ce chiffre.

$$\text{PD-CAAS} = (\text{IC} \times \text{CUD}) / 100$$

Cet indice recommandé depuis 1989 par l'OMS et la FAO présente, là aussi, des imprécisions notamment sur la biodisponibilité des AA (aucune prise en compte de la présence de facteurs antinutritionnels, mauvaise estimation de la digestibilité). La FAO, dans un rapport récent, propose de le remplacer par l'indice de digestibilité des AA indispensables, le DIAAS (*Digestible Indispensable Acid Amine Score*). Cette nouvelle méthode, plus précise, n'est pas encore pleinement opérationnelle. Seul un petit nombre de protéines a été évalué. La présence de facteurs antinutritionnels, la vitesse d'assimilation peuvent aussi être vues comme des facteurs de qualité d'une source protéique [AFSSA, 2007] [FAO, 2011] [IFN, 1997a] [SCHAAF SMA, 2000] [WHO, 2007].

f. Tour d'horizon des aliments source de protéines

Deux catégories d'aliments permettent d'apporter ces nutriments. D'un côté, il y a les protéines animales présentes dans le lait et ses produits dérivés, les œufs, les viandes et produits carnés, les poissons et produits de la pêche. De l'autre, il y a les protéines végétales contenues dans les céréales, les légumineuses et les oléagineux principalement. Ces deux familles présentent des différences (Tableau IX) quant à leur composition protéique. Les protéines animales sont plus riches en AA indispensables avec un bon équilibre dans leur composition (aminogramme) et une bonne digestibilité, même si elles apportent plus de lipides. Les protéines végétales peuvent être moins bien digérées et déficitaires en certains AA. C'est le cas de certaines céréales qui ont de faibles teneurs en lysine et les légumineuses qui n'apportent pas assez d'AA soufrés (méthionine et cystéine).

Tableau IX. Profils des protéines de certains aliments [FAO, 1991] [WHO, 2007]

Indice de qualité	PD CAAS* (%)	Digestibilité réelle des protéines (%)
Aliments		
Lactosérum } lait de	100	98
Caséine } vache	100	94
Oeuf	100	97
Soja : protéine concentré	99	95
Boeuf	92	94
Soja : protéine isolé	92	95
Pois chiche	71	88
Haricot blanc	68	78
Pois	68	83
Arachide	52	94
Lentille	52	84
Riz (poli)	47	88
Farine de blé	40	96

*PD-CAAS : Protein Digestibility Corrected Amino Acid Score

Il sera plus aisé d'obtenir un maintien de masse musculaire, une hypertrophie avec un apport de protéines d'origine animale. Mais diversifier son apport, en n'excluant aucune catégorie d'aliment, doit tout de même être recherché. Tout simplement car les qualités nutritionnelles des différents types d'aliments ne se résument pas qu'à ce macronutriment [FAO, 1991] [WHO, 2007].

Les protéines animales

Les protéines laitières et fromagères

Je ne prendrai pas part au débat suscité par un hypothétique problème de santé public lié à la consommation de lait. Mes propos seront une simple récapitulation de données officielles (fournie entre autres par l'ANSES), les sportifs étant libres d'inclure ou non cet aliment dans leur régime alimentaire. Les chiffres que je vais citer concernent le lait de vache. Ce dernier comporte une teneur peu élevée mais tout de même non négligeable en protéines de haute qualité nutritionnelle : de l'ordre de 30 grammes par litre (soit 3%). Cette quantité est la même quelle que soit le type de lait consommé (entier, écrémé, demi écrémé). L'apport calorique est lui différent car il est impacté par la quantité de lipides (de 63 kcal/100g pour le lait entier à 35 kcal/100g pour le lait écrémé). La qualité nutritionnelle des protéines qui le composent est excellente (CUD, PD-CAAS). Deux types de fractions protéiques sont présents. La première est constituée de protéines insolubles de caséines.

Cette partie constitue 80% des protéines totales. La caséine est une protéine à assimilation lente et se présente sous forme de micelles. La diminution du pH au niveau gastrique déstabilise les micelles qui coagulent et précipitent en formant un gel. C'est ce phénomène qui allonge la durée de la vidange gastrique. La caséine a d'autres propriétés comme le fait de fixer le calcium et d'augmenter son assimilation. Au niveau de sa composition, elle présente une forte teneur en lysine, en acide glutamique et en tyrosine mais est moins bien dotée en AA soufrés. La seconde fraction, soit 20% du total, est composée par les protéines solubles sériques du lactosérum (petit lait ou *whey* en anglais). Cette fraction comporte de la β -lactoglobuline en majorité (qui améliore l'absorption du fer, de la vitamine B12 et de la vitamine A), de l' α -lactalbumine et d'autres molécules comme le sérum albumine bovine et la lactoferrine (plus des immunoglobulines, des enzymes et hormones comme l'insuline). Le profil protéique, la digestibilité sont excellents. Au niveau de la composition, les protéines du petit lait sont dotées en AA ramifiés, 25% du total et surtout en leucine. Elles contiennent aussi de bonnes quantités de lysine, de cystéine, de tryptophane et sont mieux dotées que la caséine en ce qui concerne les AA soufrés. A l'inverse, le lactosérum est plus pauvre en arginine et glutamine. La vitesse d'assimilation est cette fois plus rapide. Concernant la β -lactoglobuline, elle peut présenter un caractère allergisant chez certains individus [AFSSA, 2007] [ANSES, 2016a] [DELAVER ET GUNDILL, 2012] [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b].

Les fromages regroupent un grand nombre de produits. Les laits utilisés, les processus d'obtention modifient plus ou moins fortement les caractéristiques nutritionnelles de ces produits. La teneur en protéines et en lipides ainsi que la valeur calorique en dépendent. A partir d'un lait ayant une teneur protéique de 3%, il est possible d'obtenir des fromages avec une teneur comprise entre 9% (fromages blancs) et 30% (fromages à pâte dure de type parmesan, gruyère, emmental). La qualité des protéines fromagères est un peu en dessous de celle du lait. Lors de l'égouttage, il y a une perte plus ou moins importante des protéines solubles du lactosérum. La valeur protéique dépend donc presque exclusivement de la caséine. Certaines étapes de fabrication comme une cuisson, un affinage (surtout pour les fromages à pâte molle) impactent négativement certains AA. A l'inverse, la digestibilité de la caséine peut être accrue (hydrolyse enzymatique) [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b].

Le lait fermenté est une classe alimentaire qui regroupe les yaourts. Un yaourt nature sans adjonction de sucre a une densité calorique de 50 kcal/100 gr (70 pour les yaourts au lait entier) et contient aux alentours de 4% de protéines (il y a un enrichissement lors de la fabrication par l'adjonction de protéines de lait). Les protéines sont de bonnes qualités nutritionnelles. Un yaourt contient moins de lactose (de 20 à 30%) et beaucoup de calcium. Les yaourts sucrés sont plus caloriques et ont une teneur plus faible pour ce macronutriment. Les desserts lactés frais sucrés ne subissent pas de fermentation lactique.

Ils sont obtenus par différents procédés lors desquels différents sucres, des lipides, des additifs alimentaires peuvent être additionnés. Leur intérêt nutritionnel est limité.

La haute qualité des protéines que contient cette catégorie d'aliment en fait une source à ne pas négliger. Même si la teneur moyenne en ce macronutriment est modérée (10 grammes de protéines sont apportés par 300 ml de lait ; 100 grammes de fromage blanc ou 2 yaourts), le lait, les yaourts, les fromages blancs sont des produits pratiques à consommer. L'athlète doit cependant présenter une bonne tolérance digestive. Une consommation raisonnée et modérée doit être envisagée pour les fromages et les desserts lactés sucrés (moins intéressant nutritionnellement).

Les œufs

L'œuf représente une excellente source de protéines pour le sportif. Sa composition ainsi que la haute qualité des protéines qui le composent sont autant d'atouts mis à la disposition de l'athlète (excellent PD-CAAS). Sur le plan des caractéristiques générales : il existe 4 calibres d'œufs différents (S : 50 à 53 grammes ; M : 53 à 63 grammes ; L : 63 à 73 grammes ; et XL > 73 grammes) ; le poids moyen se situe aux alentours de 60 grammes ; trois parties le constituent : la coquille (10% soit 6 grammes), le blanc ou albumen (60% soit 36 grammes), le jaune ou vitellus (30% soit 18 grammes). Son origine ainsi que le mode d'élevage sont inscrits sur la coquille : marquage 0 pour biologique, 1 pour du plein air, 2 pour un élevage dit au sol et 3 pour de la cage. Ces informations sont importantes car les conditions d'élevages des poules pondeuses impactent fortement les qualités lipidiques et micronutritionnelles du jaune d'œuf.

Le blanc d'œuf est une partie non homogène riche en eau (88,6%) et en protéines. Ainsi 100 grammes d'albumen (3 blancs) apportent : 47 kcal, plus de 10 grammes de protéines, peu de glucides et de lipides. L'ovalbumine est la protéine la plus présente dans le blanc d'œuf (54% du total protéique). Ensuite, viennent des protéines comme l'ovotransferrine, l'ovomucoïde, des ovoglobulines, le lysozyme, l'ovomucine et d'autres fractions plus faiblement présentes. Les AA qui composent ces protéines sont bien équilibrés (PD-CAAS élevé), tous les AA essentiels sont présents avec des teneurs plus fortes en AA soufrés et en lysine. L'inconvénient principal du blanc d'œuf cru est qu'il contient des facteurs antinutritionnels qui abaissent la digestibilité (51%) ainsi que des facteurs à fort caractère allergisant. C'est le cas de l'ovomucoïde qui est un inhibiteur de la trypsine et qui est très allergisant (comme l'ovomacroglobuline) ou aussi des ovoides qui réduisent l'action des protéases. La solution réside dans la cuisson du produit car la chaleur réduit l'activité des antiprotéases et facilite l'accès des enzymes digestives aux liaisons peptidiques. Ainsi, le blanc d'œuf cuit a un CUD qui augmente de manière radicale (passant de 50 à 92%) avec un potentiel allergisant qui diminue. Le blanc d'œuf contient aussi de

nombreux facteurs antimicrobiens : CO₂, pH alcalin et aussi des protéines à activités antimicrobiennes (ovotransferrine, lysozyme).

Le jaune d'œuf ou vitellus est une suspension de particules dans une phase aqueuse. Cette partie contient moins d'eau que le blanc (49%) mais est plus riche en protéines, lipides, vitamines et minéraux. Ainsi 100 grammes de jaune apportent : 364 kcal, 16 grammes de protéines, 34,5 grammes de lipides : 65% de triglycérides (TG), 31% de phospholipides et 4% de cholestérol. Les conditions d'élevage et la qualité de l'alimentation déterminent les propriétés micronutritionnelles du jaune. Les œufs issus de poules bénéficiant des meilleures conditions de vie contiennent de bonnes quantités d'acides gras polyinsaturés (AGPI), de minéraux (phosphore, fer, potassium, iode, sélénium, zinc, soufre), de vitamines (A, D, E, K et vitamines du groupe B) de caroténoïdes comme des xanthophylles anti-oxydants (lutéine : jusqu'à 2,5 mg/100g et zéaxanthine jusqu'à 1,3 mg/100g). Les teneurs en minéraux majeurs (sodium, potassium, calcium, phosphore) fluctuent peu et sont indépendants de l'alimentation des poules. Concernant les protéines, la plupart d'entre elles sont associées à des lipides et se présentent sous forme de lipoprotéines de densités variables (lipovitellines et lipovitellinines). Une proportion plus faible englobe des phosphoprotéines comme une phosvitine et des livétines (propriétés allergisantes de l' α -livétine). A l'instar du blanc d'œuf, la composition en AA est très bien équilibrée avec la présence de tous les AA essentiels. Le jaune d'œuf contrairement au blanc présente une bonne digestibilité crue. Il faut éviter tout excès de cuisson car cela diminue la digestibilité des lipoprotéines en les rendant moins sensibles au travail des enzymes digestives. Contrairement au blanc, le jaune est un milieu favorable au développement des bactéries (milieu acide sans facteurs de protection).

La quantité et la qualité nutritionnelle des protéines (PD-CAAS supérieur à 100, richesse en AA soufrés et aucun AA limitant) sont autant d'atouts qui conditionnent leur consommation par le sportif de FA. D'anciennes données limitaient fortement la consommation d'œufs entiers à cause de leur richesse en cholestérol et de l'incidence sur les pathologies cardio-vasculaires. Des études plus récentes relativisent ces craintes (plus d'explications dans la partie consacrée aux lipides), si bien qu'un sportif sans problème de santé particulier peut en consommer quotidiennement (la littérature donne le chiffre sécuritaire de 3). Les individus souffrant de pathologies diverses comme ceux présentant des problèmes cardio-vasculaires, les diabétiques doivent évidemment être beaucoup plus strict avec cet aliment. La meilleure digestibilité de l'œuf est obtenue avec un blanc cuit et un jaune liquide. L'œuf mollet, l'œuf à la coque ou au plat sont donc particulièrement indiqués [AFSAA, 2007] [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b] [NAU, NYS, YAMAKAWA *et al.* 2010] [NYS ET SAUVEUR, 2004].

La viande et les produits carnés

1. Viandes de boucherie

Les parties consommables viennent principalement des muscles striés de l'animal. Certaines pièces sont composées d'os, de muscles et de tissus gras, d'autres sont dites parées (le tissu musculaire est débarrassé des parties qui l'entourent). Les viandes proviennent principalement du bœuf, du veau, du mouton, de l'agneau et du porc. Le rapport entre protéines et lipides dépend de l'espèce animale, du type de morceau choisi et du parage éventuel. La nature des protéines est de deux types. Tout d'abord, il y a les protéines intracellulaires, plus qualitatives, comme les protéines myofibrillaires (actine, myosine, protéine C, protéine M, tropomyosine), les protéines sarcoplasmiques et mitochondriales ainsi que l'hémoglobine. Puis, il y a les protéines du tissu conjonctif avec le collagène et l'élastine (insoluble). Les valeurs nutritionnelles sont diverses car elles dépendent du type de morceau consommé et de leur ratio protéines intracellulaires/ tissu conjonctif.

La valeur énergétique de la viande dépend du morceau et varie de 120 kcal/100g pour des pièces maigres (steak, escalope, rosbif, steak haché 5%) à plus de 200 kcal/100g (gigot, épaule, entrecôte, steak haché 15%). Elle contient en moyenne 18% de protéines, 10% de lipides, de la carnosine, des minéraux comme du fer, du phosphore, du zinc, du sélénium et des vitamines B12, PP, B1. Les teneurs protéiques les plus élevées se rencontrent dans la viande de cheval puis de bœuf, de porc et enfin de mouton. Les morceaux de première catégorie (filet, onglet, hampe, bavette de bœuf ; côte et noix de veau ; filet de porc) sont également plus riches en protéines intracellulaires. La valeur protéique dépend du rapport existant entre les différentes protéines qui constitue la pièce consommée. L'espèce de l'animal joue peu sur la composition en AA. Ce qu'il faut prendre en compte, c'est la proportion de collagène donc de tissu conjonctif par rapport aux protéines intracellulaires, car les caractéristiques de digestion et de composition en AA ne sont pas du tout les mêmes. Ainsi le collagène est pauvre en AA indispensables, il ne contient pas de tryptophane et très peu d'AA soufrés mais il est riche en glycine, proline, hydroxyproline. Il présente une digestibilité modérée dans son état de base (l'élastine est indigeste). Ce qui implique que les différents marqueurs de qualité (CUD, VB, IC) sont médiocres. Alors que c'est l'inverse pour les protéines contractiles qui présentent une bonne digestibilité (CUD > 90), une assimilation rapide (si bonne mastication) et une haute qualité en AA (richesse en lysine).

L'idéal pour le sportif de FA est de consommer des morceaux avec le plus faible rapport collagène/protéines intracellulaires (première catégorie). Les morceaux plus riches en collagène (paleron, collier, gîte de noix de bœuf ; épaule de veau, de porc) conviennent aussi mais doivent être cuits plus longtemps pour améliorer quelque peu la digestibilité. Même si c'est une excellente source de protéines, les instances sanitaires conseillent de

limiter les apports en viande (présence de lipides et d'acides gras saturés : AGS). La quantité maximale recommandée est fixée à 500 grammes par semaine. Une surconsommation de viandes (valable aussi pour la charcuterie, les abats, le gibier) peut être un facteur de risque associé à des pathologies comme le cancer colorectal (données disponibles via l'étude EPIC : *European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition*) [AFSSA, 2007] [ANSES, 2011b] [ANSES, 2016a] [CLAVEL-CHAPELON ET BOUTRON-RUAULT, 2005] [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b].

2. Viandes blanches : volailles et lapins

Cette catégorie présente une grande importance dans le régime d'un sportif de FA. La viande de volaille et celle de lapin possèdent une forte teneur en protéines : au-delà de 20%. Elles présentent aussi généralement une plus faible valeur énergétique que les viandes rouges (une fois la peau retirée) à cause de la moindre présence de lipides (l'oie est un cas à part). Au niveau des valeurs qualitatives de ces protéines, elles sont proches de celles des viandes de boucherie de première catégorie, la nature de ce macronutriment étant la même. Le rapport collagène/ protéines contractiles est plus faible que pour les viandes dites rouges (sauf le lapin qui est plus riche en collagène). La viande de volaille présente une haute valeur nutritionnelle et une bonne digestibilité. Contrairement aux viandes rouges, il n'y a pas de recommandations de consommation particulières [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005].

3. Gibier et Abats

La viande de gibier contient une bonne proportion de protéines de hautes qualités nutritionnelles (plus de 20%). Elle est également moins calorique que celle de boucherie car moins riches en lipides. Une consommation est donc tout à fait possible pour un athlète, à condition de respecter les recommandations d'apports en ce qui concerne les viandes rouges, et aussi que le sportif ne présente pas de troubles du métabolisme de l'acide urique. Les abats présentent, comme pour le gibier, une consommation limitée, certaines pièces étant chères, peu faciles à préparer et rapidement périssables. Généralement, il faut distinguer les abats rouges (rognon, foie, cœur, rate, mou, ris), des abats blancs (tripes et cervelle). La première catégorie présente une bonne teneur en protéines et une qualité équivalente à la viande de boucherie. La densité nutritionnelle est plus élevée car certaines parties comme le foie sont très riches en minéraux et vitamines : fer héminique, cuivre, zinc, vitamines A et B. Les abats blancs sont moins intéressants, la cervelle est riche en AGS et les tripes contiennent beaucoup de collagène et d'élastine. Attention également à la richesse en cholestérol et en acide urique de certains aliments [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005].

4. Produits de charcuterie

Les modes de fabrications et la nature des produits utilisés font que les produits de charcuterie possèdent des valeurs nutritionnelles diverses. En règle générale, ils ont une

bonne teneur en protéines (moyenne de 17%), l'inconvénient est qu'ils sont très énergétiques, très riches en AGS et en sodium (l'OMS recommande d'en consommer 5 grammes par jour). Leur consommation, même pour un sportif de FA ayant des besoins caloriques très élevés, est à limiter. Un apport trop conséquent et l'excès de sel et d'AGS qui en résultent, peuvent impacter négativement la santé : cancer colorectale, maladies cardiovasculaires. L'achat d'aliments déjà préparés conduit au fait de n'avoir aucun contrôle sur leurs compositions réelles. Pour une question de praticité, des produits de charcuterie comme le jambon cuit supérieur (qui est sans additifs comparé au jambon standard auquel sont ajoutés des gélifiants et des polyphosphates) et le filet de bacon, peuvent tout de même être incorporés dans l'alimentation du sportif. Ils sont moins caloriques (130 kcal/ 100g) et contiennent, par comparaison avec les autres produits de la classe, relativement peu de lipides (peu d'AGS), moins de sel, tout en gardant une forte quantité de protéines (20%) [ANSES, 2011b] [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005].

Les produits de la pêche

1. Les poissons

Tout comme pour les viandes, cette famille regroupe tout un règne animal. D'un point de vue nutritionnel, c'est par leur teneur en lipides et le type de muscles qui les composent qu'ils seront étudiés. Il en existe principalement deux types. Les poissons dits maigres à chair blanche contiennent peu d'hémoglobine et de lipides (moins de 1%): bar, colin, cabillaud, merlan, lieu, merlu, tanche, goujon, carpe. Les poissons plus gras à chair sombre contiennent davantage de lipides et d'hémoglobine : anchois, hareng, maquereau, saumon, thon rouge, sardine, truite. Les muscles des poissons sont constitués en filets. La composition et l'organisation de cette structure diffèrent quelque peu de celles des mammifères et des oiseaux. Ici, il n'y a pas de système tendineux. Le muscle présente d'une manière générale : moins de tissu conjonctif, moins de myoglobine et une proportion de composants azotés non protéiques plus importante. Plusieurs caractéristiques découlent de ces différences. Tout d'abord, le collagène qui le compose se gélatinise à une température inférieure à celle des mammifères et des oiseaux, 40°C contre 80. C'est pourquoi, la chair des poissons tient moins bien la cuisson que la viande. Le court-bouillon entraîne des pertes nutritionnelles plus importantes que d'autres modes de cuisson (four, vapeur). Pour sa consommation, il faut donc essayer de privilégier des modes de cuisson adaptés. La chair est aussi plus périssable. La diminution du pH et la présence de composés azotés rendent la chair facilement contaminée par le développement de micro-organismes [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005].

Sur le plan quantitatif, la teneur moyenne en protéines est de 19% avec un maximum obtenu pour le thon jaune (de 22 à 26%). Au niveau de la qualité nutritionnelle des protéines de poisson, leur composition en AA est quasi similaire à celui des protéines de viande, il n'y a pas de facteur limitant (la lysine est très représentée). La moindre présence de collagène augmente la digestibilité de cet aliment (CUD > 90). La consommation de poisson possède d'innombrables atouts pour la santé. C'est pourquoi l'ANSES recommande d'en consommer au moins deux fois par semaine avec une alternance entre poissons maigres et poissons gras. L'athlète de FA ne déroge pas à la règle. A l'image des produits carnés qui possèdent des recommandations d'apports, il en va de même ici mais pour des raisons différentes. Le problème avec le poisson est que la chair des espèces est facilement contaminée par des micro-organismes, des toxines. Certaines espèces, en particulier les poissons prédateurs, présentent de fortes concentrations en métaux lourds et en composants organiques. Même si la plupart des recommandations sont éditées pour les femmes enceintes et allaitantes ainsi que pour les enfants en bas âge, les sportifs de FA peuvent tout de même en être avertis car leur alimentation hyperprotéinée peut inclure des quantités plus importantes de poissons. Un résumé des recommandations est d'ailleurs disponible sous forme de plaquette sur le site de l'ANSES, il s'intitule : « Poissons et produits de la pêche, conseils de consommation ». Concernant les métaux lourds et le PCB (polychlorobiphényles), l'étude Calipso, réalisée en 2006, a permis de poser quelques règles à respecter. Tout d'abord, les poissons prédateurs sauvages (l'élevage n'est pas concerné) comme par exemple le bar, la lotte, le brochet, la daurade, le flétan, le requin, le thon, la raie, le marlin, l'espadon, l'anguille sont plus sensibles à une contamination par différentes métaux lourds. Le plomb, l'arsenic, les organoétains ne présentent à priori pas de risques majeurs mais ce n'est pas le cas du méthylmercure (action nocive sur le système nerveux central) ainsi que du cadmium. L'ANSES ne déconseille pas aux des adultes en bonne santé d'en consommer mais simplement de diversifier les apports et de faire plus attention aux espèces plus fortement contaminées comme les requins et les espadons. Un autre problème concerne la présence de contaminants organiques (les polychlorobiphényles ou PCB, les dioxines) dans certains poissons gras et bio-accumulateurs comme l'anguille, le brème, la carpe, le silure, le barbeau. Ici l'agence conseille d'en consommer au maximum deux fois par mois et moins encore pour l'anguille [ANSES, 2010].

2. Crustacés et mollusques

Les crustacés présentent des teneurs en protéines proches des poissons (18%), ils sont pauvres en lipides et plus riches en vitamine B12, zinc et cuivre. La qualité des protéines est assez semblable aux poissons. Leur consommation est donc tout à fait appropriée pour les athlètes de force, le point limitant se trouve au niveau du coût financier important que peut présenter leur consommation. Les mollusques présentent des teneurs en protéines plus

faibles que les autres produits de la mer. L'huître par exemple n'en contient que de 7 à 8 %. La qualité nutritionnelle de leurs protéines est plus faible et ils sont assez riches en sodium. Cette classe présente tout de même des atouts : les aliments sont riches en AA essentiels (lysine, cystéine), en taurine (propriétés anti-oxydantes, hépatoprotectrices). Ils apportent également du magnésium, du fer héminique bien absorbé, de la vitamine B12, du sélénium, de l'iode, du zinc. Ces deux classes présentent des aliments peu caloriques (la plupart se situe aux alentours de 100 kcal/ 100g). Attention toutefois à la consommation de coquillages car leur ingestion à l'état cru peut être à l'origine d'allergies ou d'une contamination par des virus (hépatite A), des bactéries (listéria), des parasites, des métaux lourds, des produits toxiques. Une réglementation stricte encadre leur commercialisation (lieu de récolte, chaîne du froid) diminuant de fait les risques en France. Certaines règles doivent tout de même être suivies (se reporter à la plaquette informative de l'ANSES) [ANSES, 2010] [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005].

Les protéines d'origine végétale

Les protéines alimentaires issues du monde végétal sont constituées en quatre grandes familles. Chacune d'entre elles se différencie par sa solubilité et se trouve en proportions différentes au sein de chaque aliment. Il y a tout d'abord les albumines solubles dans l'eau et qui possèdent des fonctions biologiques (enzymes) et de réserves (riches en lysine et AA soufrés). Ensuite, il y a les globulines solubles dans l'eau salée et qui sont riches en acide aspartique, en glutamine et en arginine. Ce sont les protéines de réserve majoritaires des légumineuses. Deux types de globulines existent : 7S et 11S (fonction du coefficient de sédimentation) avec une plus grande quantité d'AA soufrés dans le groupe 11S. Troisièmement, il existe les prolamines qui sont des protéines solubles uniquement dans les mélanges hydro-alcooliques. Elles sont riches en proline et glutamine et constituent les réserves d'azote principales des céréales. Cette catégorie est classée en deux groupes : les gliadines monomériques (gliadines du blé, hordéines dans l'orge, sécalines dans le seigle, avénines dans l'avoine, zéïnes dans le maïs) et les gluténines polymériques. Pour finir, il y a les glutélines qui sont des protéines insolubles. Le gluten qui est la partie protéique insoluble contenu dans les grains des céréales (blé, orge, avoine, seigle) est constitué d'un mélange de prolamines et de glutélines. Les protéines végétales sont généralement de moins bonnes qualités que celles d'origine animale car même si elles présentent tous les AA essentiels certaines peuvent être en quantités limitées. L'intérêt de leur consommation est de venir compléter l'apport global en protéines en diversifiant les sources [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b] [NESTERENKO, 2012].

Les légumineuses

1. Les légumes secs

Les légumes secs comprennent les lentilles, les pois secs (cassés ou chiches), les fèves, les haricots secs (blancs, rouges, flageolets, mungos). La teneur en protéines de ces aliments lorsqu'ils sont crus/secs se situe aux alentours de 20% avec une valeur calorique fluctuant entre 340 et 360 kcal aux 100 grammes (faible teneur en eau : 10%). Ils ne se consomment généralement pas crus. Ainsi après cuisson et trempage dans l'eau, les graines s'hydratent, prennent du volume. Pour 100 grammes de légumes secs cuits, la teneur en protéines est de 7 à 8% avec une valeur calorique autour de 100 kcal/100g. Les légumes secs contiennent trois types de protéines : des globulines en majorité (de 50 à 90%), des albumines et des prolamines (plus de l'azote non protéique). La qualité protéique générale des légumineuses à l'état cru est moyenne. La PD-CAAS est passable de par la faible présence d'AA soufrés (cystéine et méthionine). Les lentilles et haricots secs ont un facteur limitant secondaire avec le tryptophane. A l'inverse, l'ensemble de ces légumes secs est plutôt bien doté en lysine. La digestibilité n'est pas optimale à cause de la présence de fibres et surtout de facteurs antinutritionnels. Certaines légumineuses contiennent des protéines inhibitrices des protéases (trypsine et chymotrypsine), des lectines (qui altèrent les villosités de la bordure en brosse et diminuent l'activité des enzymes digestives), des facteurs de flatulences et d'allergies ou encore des phytohémagglutinines. La présence de facteurs anti-vitaminiques est aussi problématique (B1, B6, B12, A, E, D), tout comme l'acide phytique qui diminue l'absorption d'ions bivalents comme le zinc, le magnésium, le calcium et le fer. Heureusement, la plupart de ces composés sont solubles en milieu aqueux et sont thermosensibles. C'est pour ces raisons qu'il est nécessaire de « travailler » les légumineuses avant consommation. Un broyage éventuel, un trempage puis une cuisson libèrent les graines de ces facteurs antinutritionnels et permettent d'augmenter le CUD jusqu'à des valeurs atteignant les 90% [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b].

2. Le soja

Le soja ou soya (haricot chinois) est une Fabacée. C'est sa graine qui est utilisée et transformée par l'industrie alimentaire. Il ne faut pas le confondre avec les germes ou pousses de soja qui proviennent des graines du haricot mungo. Beaucoup de produits alimentaires sont fabriqués à partir de cet aliment. Différentes transformations permettent d'obtenir des aliments non fermentés comme l'huile et la farine de soja, les edamames, le lait ou jus de soja (tonyu) à partir duquel sont fabriqués des yaourts, du tofu ainsi que des aliments fermentés comme la sauce soja, le natto, le miso, le tamari ou le tofu fermenté. Les graines de soja sèches présentent une forte teneur en protéines : plus de 30% (avec 18% de lipides). Les globulines de cet aliment contiennent plus d'AA soufrés que les autres légumes secs. L'équilibre dans la composition est bon (pas d'AA limitant), c'est ce qui explique la

haute qualité des protéines du soja (PD-CAAS supérieur à 90, au même titre que les protéines d'origine animale). Comme précédemment et pour les mêmes raisons que pour les légumes secs, le CUD est passable. Mais là encore la digestibilité est grandement améliorée par trempage, broyage et cuisson des graines.

Le sportif de FA peut y avoir recours dans des quantités appropriées. La consommation de soja est sujette à recommandations à cause des isoflavones présentes. Ces molécules sont des flavonoïdes ayant des propriétés pseudo-œstrogéniques. Cette famille est d'ailleurs désignée sous le terme de phyto-œstrogène. Des études évaluent actuellement l'impact d'une forte consommation de soja sur le système hormonal humain et sur la possibilité d'éventuels effets délétères (effets sur la thyroïde, la production de testostérone, les cancers hormono-dépendants). L'ANSES conseille de limiter l'apport à 1mg/kg/j d'isoflavones. Pour indication, la farine de soja en contient 178mg/100g (utilisée pour l'alimentation des animaux), les isolats de protéines 98 mg/100g, le tofu 23 mg/100g, le tonyu ou lait de soja 10 mg/100g. Pour un sportif de poids moyen, la limite d'apport quotidienne se situe aux alentours de 7 pots de yaourts ou de 700 ml de lait. Ce seuil est atteint plus vite avec la consommation de produits comme le tofu ou des protéines de soja en poudre [AFSSA ET AFSSAPS, 2005] [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b].

Les produits céréaliers

Qu'ils soient issus du blé, du riz, du maïs, du sorgho, du millet, du sarrasin (pseudo-céréale), de l'épeautre, de l'orge, de l'avoine, du seigle, les produits alimentaires qui en découlent sont des sources de protéines végétales. Ce sont les caryopses (fruits secs) de la plante, communément appelés grains, qui sont utilisés. Même si les grains peuvent différer d'une espèce à l'autre, leur structure globale est la même : une écorce (avec assise protéique), une amande (albumen) et un germe. Chacune de ces parties contient des protéines dans des quantités raisonnables. La part la plus importante de ce macronutriment se trouve dans l'amande.

Au niveau quantitatif, les grains de blé tendre (farine, pain) ou ceux de blé dur (pâtes alimentaires) contiennent en moyenne 12% de protéines. A noter que le pain complet a une teneur plus élevée en protéines (10%) que le pain blanc (8 à 9%). Le fait de conserver une plus grande partie du grain dans les farines complètes entraîne une valeur protéique plus haute (présence des protéines de l'écorce) mais un CUD plus faible (à cause des fibres). Les teneurs en protéines des autres céréales varient : l'avoine de 13 à 15%, l'orge, le seigle, le maïs aux alentours de 10%, les grains de riz après décorticage 7%. A noter que ce sont des teneurs pour des aliments pesés crus. Une fois que l'aliment est cuit, la teneur en protéines diminue : de 2,5 à 5% pour le riz et les pâtes (phénomène de dilution dû à l'hydratation des grains). La qualité des protéines des céréales est basse (mauvais PD-CAAS). Les prolamines, majoritaires ici, souffrent d'un manque de lysine dans leur composition globale.

Le maïs présente aussi une carence en tryptophane. La digestibilité des aliments varie de 75 à 90%, à condition de les avoir débarrassés de leurs composés antinutritionnels comme l'acide phytique, les inhibiteurs de protéases, l'inhibiteur de l'amylase du blé, la thiaminase du riz, les facteurs anti-vitamine PP du sorgho. A l'instar des légumes secs, les différents processus de fabrications, la cuisson, le trempage permettent leur destruction. Un mot sur le quinoa qui est souvent considéré à tort comme une céréale. En fait, il fait partie des Chénopodiacées. Cette pseudo-céréale possède une bonne teneur en protéines (15%), une bonne digestibilité et présente une meilleure composition en AA essentiels que les céréales. Le quinoa a tout de même une limite pour certains AA aromatiques comme la phénylalanine et la tyrosine [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b] [RUALES ET NAIR, 1992].

Il est indispensable pour les sportifs de FA présentant une maladie coéliqua de pouvoir dissocier les aliments qui contiennent du gluten, de ceux qui en sont dépourvus. Le blé, le seigle, l'orge, l'épeautre, le kamut et donc tous les produits qui en dérivent (pains, pâtes, pâtisseries, biscottes, boissons alcoolisées comme la bière) en renferment. A l'inverse, le riz, le sarrasin, le maïs, le millet, le quinoa (à condition de ne pas avoir été contaminé) n'en ont pas. L'avoine est un cas particulier. A l'origine, son grain ne contient pas de gluten. Mais dans de nombreux pays, son mode de culture, sa récolte et sa transformation se font à proximité de céréales comme du blé. De ce fait, les grains peuvent se faire contaminer et contenir du gluten.

Les fruits : sous-groupe des graines oléagineuses

Cette classe regroupe différents aliments comme les amandes, les noix, les noisettes, les noix de macadamia, les pistaches, les graines de sésame, de tournesol, les pignons (les cacahuètes sont des légumineuses). Ces aliments possèdent une bonne teneur en protéines : de 16% pour la noisette à 25% pour l'amande. La qualité n'est pas très élevée car plusieurs AA essentiels ne sont pas bien représentés : les AA soufrés, la lysine, la thréonine [FREDOT, 2005] [IFN, 1997b].

Les compléments alimentaires : les protéines en poudre

Les protéines en poudre ne sont pas des substances dopantes, leur utilisation ne permet pas de décupler les performances sportives. Elles représentent simplement une option à disposition du sportif afin de l'aider à compléter son apport protéique quotidien et de maintenir une balance azoté positive. Aucunement indispensables, elles sont surtout utilisées pour leur praticité et leur facilité d'utilisation lors des collations, autour de l'entraînement ou entre les repas. Il s'agit d'une complémentation pratique qui ne doit pas se substituer, ni réduire l'apport alimentaire classique. La quantité de protéines en poudre à

utiliser ne doit pas excéder un tiers de l'apport protéique total [AFSSA, 2007] [DELAVIER ET GUNDILL, 2012].

Il existe différents types de protéines en poudre, ils dépendent du produit d'origine. La *whey* protéine ou protéine de lactosérum (petit lait) est le produit le plus consommé. La très haute valeur protéique du lactosérum (riche en cystéine et en AA ramifiés : 12 grammes de leucine aux 100 grammes) est un des arguments en faveur de son utilisation. La *whey* protéine provient soit des déchets issus de l'industrie fromagère, soit directement du lait. Quelle que soit son origine, le produit subit différentes transformations. Lors de sa fabrication, des processus d'extractions et de filtrations permettent de retirer l'eau ainsi qu'une grande partie des glucides et des lipides. Il reste une poudre riche en protéines (les mêmes que dans l'aliment d'origine). L'adjonction d'édulcorants permet d'aromatiser cette poudre. L'extraction des protéines du lactosérum peut se faire de différentes manières. La méthode standard qui dénature le moins les protéines est la microfiltration (contrairement à la technique par échanges d'ions). En fonction du degré de filtration, trois produits aux propriétés différentes sont obtenus. Le concentré de *whey* est la forme de base, cette protéine en poudre est la moins coûteuse. Ici, la filtration n'est pas optimale, le produit final contient entre 70 et 80% de protéines, le reste étant des glucides (du lactose) et des lipides résiduels. L'isolat de *whey* a un degré de filtration supérieur, son prix est donc plus cher. Il contient davantage de protéines (>90%), moins de lipides et de glucides. Enfin l'hydrolysate de *whey* est un produit qui a subi une prédigestion enzymatique, la poudre contient des peptides à assimilation rapide (goût médiocre, accélération possible du transit). Ces protéines entraînent une disponibilité plasmatique rapide des AA qui les composent. Leur prise est donc à privilégier autour de l'entraînement [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [TANG, MOORE, KUJBIDA *et al.*, 2009].

A partir du lait, les industriels fabriquent également des protéines en poudre de caséines. Trois catégories de produits existent : le caséinate de sodium (moindre coût de fabrication, qualité en AA basse), la caséine micellaire (meilleure qualité des AA, plus forte assimilation, durée d'action plus importante) et l'hydrolysate de caséine (le plus cher). La vitesse d'assimilation de la caséine est lente (exception faite de l'hydrolysate). Contrairement à la *whey* protéine qui favorise l'anabolisme, la caséine limite le catabolisme (nocturne et entre les repas). Elle diminue plus fortement la dégradation des protéines qu'elle n'induit une hausse de l'anabolisme. Son utilisation est à privilégier entre les repas lorsque ces derniers sont espacés de plusieurs heures et au coucher. L'hydrolysate de caséine est une exception, la prédigestion enzymatique permet d'obtenir un produit qui contient des petits peptides très rapidement assimilés. Il peut donc être utilisé juste avant, pendant ou après une séance d'entraînement. Il existe d'autres protéines en poudre (de soja, de riz, de pois ou

de chanvre) [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [TANG, MOORE, KUJBIDA *et al.*, 2009] [VENESSION, 2011].

g. Conséquences d'un régime hyperprotéiné sur la santé de l'athlète de force

Le premier point, et celui qui revient le plus souvent, est qu'un apport élevé de protéines affecte la fonction rénale. Il est impossible de nier qu'une alimentation riche en protéines peut influencer la dégradation de la fonction rénale chez des personnes souffrant déjà d'une insuffisance à ce niveau et chez des individus à forte restriction hydrique. Cela s'explique par le métabolisme des produits azotés : excrétion rénale et interaction avec la filtration glomérulaire. Par contre, aucune relation n'a été établie entre ce type de régime et l'excrétion d'albumine qui est un indicateur de détérioration du rein. Chez des personnes saines s'hydratant de manière adaptée, les protéines modifient l'activité rénale mais ne la détériorent pas. Par mesure de précaution, la *World Health Organization* (WHO) conseille tout de même aux personnes susceptibles de développer une insuffisance rénale (les diabétiques, les hypertendus...) de restreindre leur apport en protéines [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [WHO, 2007].

Le deuxième effet qu'il est possible de constater est une acidose métabolique. Ce phénomène, dans le cas présent, a une double origine. Il est lié à la mise en place d'une alimentation hyperprotéinée sans intégration suffisante d'aliments basifiants. L'ingestion de protéines et surtout d'AA soufrés provoquent une accumulation de charges acides au niveau sanguin. L'indice PRAL (*potentiel renal acid load*) permet de visualiser cet effet car il mesure l'impact de l'ingestion de 100 grammes d'aliments sur l'équilibre acido-basique du sang (mesuré en milliéquivalents). L'acidification de l'organisme est aussi provoquée par l'entraînement de force (voie anaérobie). Afin de lutter et de contrebalancer ce phénomène, le sportif de FA doit adopter une alimentation riche en aliments basifiants: fruits, légumes, épices, eaux minérales plates ou gazeuses riches en bicarbonates [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [WHO, 2007].

Dans le cas d'un athlète ayant un régime déséquilibré, la survenue de problèmes osseux est à craindre : fragilisation et fractures. Les effets délétères à ce niveau existent car les os, par la libération de phosphates de calcium dans la circulation, jouent un rôle de système tampon. Ils régulent la balance acido-basique de l'organisme (au même titre que les reins, les poumons). Si l'alimentation permet de maintenir l'équilibre acido-basique et qu'elle apporte suffisamment de vitamines et de minéraux (calcium, vitamine D, magnésium), les effets négatifs sur la matrice osseuse seront fortement diminués. Une autre conséquence est qu'un apport élevé en protéines augmente l'excrétion urinaire de calcium. C'est en réalité une action compensatrice car dans le même temps, les protéines améliorent l'absorption de ce minéral. Par des mécanismes complexes encore non totalement élucidés, il semblerait

même qu'un apport important de protéines aient un effet bénéfique, via l'IGF-1, sur la densité osseuse [BONJOUR, 2011] [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [WHO, 2007].

Pour finir, des effets sur l'incidence de pathologies cardio-vasculaires, cancéreuses ou encore de coliques néphrétiques ont été étudiés. Ce régime alimentaire ne peut expliquer à lui seul l'augmentation de ces maladies dans la population car elles ont une origine multifactorielle. C'est l'accumulation de mauvaises habitudes alimentaires (apport excessif de mauvais lipides et de glucides), des comportements à risques (tabac, alcool...) qui favorisent la survenue de problèmes de santé. Si l'athlète apporte le surplus de protéines via un plan alimentaire intelligemment conçu (hydratation adaptée et aliments basifiants suffisants) et que son hygiène de vie est saine, alors l'incidence de développer ces pathologies devrait être faible [WHO, 2007].

2. Les lipides : un macronutriment indispensable

a. Généralités : classification, origines, fonctions

Les lipides sont des macronutriments très énergétiques apportant 9 kcal par gramme, plusieurs molécules les composent. En premier lieu, il y a les acides gras (AG) qui peuvent se rencontrer libres ou estérifiés avec du glycérol : monoglycéride, diglycéride et TG. Les AG composent également des hétérolipides : phospholipides, sphingolipides. A côté de ces molécules, il existe les esters de cholestérol. Nous consommons 95 à 98% de lipides sous forme de TG. La seconde place est occupée par les phospholipides. L'alimentation est importante car certaines de ces molécules ne sont pas synthétisables par l'organisme et parce qu'elle se doit d'apporter chaque catégorie de lipide dans des proportions suffisantes et harmonieuses afin d'éviter tout déséquilibre et phénomène néfaste pour l'athlète [ANSES, 2011a].

Les lipides ont un rôle énergétique. Après la phase de digestion et de transport, certains sont mis en réserve sous forme de TG dans les adipocytes (à noter que les glucides, l'alcool peuvent également être stockés sous cette forme). L'organisme peut ensuite se servir de cette source d'énergie lors de situations bien précises. Ils possèdent aussi une fonction structurale car les phospholipides essentiellement, le cholestérol et les sphingolipides dans une moindre mesure, constituent la structure des membranes cellulaires suivant une architecture en bicouche lipidique. A ce niveau, ils permettent la cohésion de la structure et lui apportent une fluidité. Les lipides ont également des rôles fonctionnels. Ils sont les précurseurs permettant la synthèse de médiateurs et de régulateurs intercellulaires. C'est le cas avec les molécules de la famille des eicosanoïdes (via l'acide arachidonique) regroupant les leucotriènes et les prostanoïdes : prostaglandines, prostacyclines, thromboxanes. Les eicosanoïdes sont responsables de nombreuses actions physiologiques et peuvent être utilisés comme précurseurs pour la synthèse d'hormones et le transport de

molécules comme les vitamines liposolubles. Le cholestérol sert de base pour la synthèse d'hormones stéroïdes (testostérone), de vitamine D et d'acides biliaires [ANSES, 2011a] [MENGUAL, 2012b] [MORIN et PAGES-XATART-PARES, 2012].

b. Tour d'horizon des acides gras

Les Acides gras saturés (AGS)

Les AGS possèdent une chaîne aliphatique avec un nombre d'atomes de carbone variable (de 4 à plus de 20) et aucune double liaison. Les AGS, dans leur ensemble, sont souvent considérés comme de mauvais lipides. Il est nécessaire de reconsidérer cette notion car tous les composés de cette famille ne sont pas à mettre au même niveau. Apportés dans des quantités adéquates et harmonieuses, les lipides n'augmentent pas les risques de pathologies cardiovasculaires, cancéreuses. Par contre, il est nécessaire de craindre l'excès de certains AG car c'est leur accumulation qui engendre des conséquences néfastes sur l'organisme. A cette fin, il faut sous-catégoriser cette famille et ne plus la voir comme un seul et même ensemble.

Les AGS à chaîne courte comme l'acide butyrique (C4 : 0), à chaîne moyenne avec l'acide caproïque (C6 : 0), l'acide caprylique (C8 : 0), l'acide caprique (C10 : 0) possèdent des fonctions intéressantes pour l'organisme et ne favorisent pas l'hypercholestérolémie. L'acide butyrique, en plus d'être apporté par l'alimentation, est produit de manière endogène par certaines bactéries coliques lors du processus de fermentation (apport adéquat de fibres prébiotiques). Loin d'être néfaste, son action est essentielle. A l'image de la glutamine qui est le substrat énergétique préférentiel des entérocytes, lui est celui des colonocytes. Le butyrate régule l'expression génique des cellules épithéliales tumorales en diminuant leur taux de renouvellement. Une alimentation qui favorise la présence de ce lipide au niveau intestinal (intérêt des fibres) permet donc de diminuer les risques de développer un cancer du côlon. Ces AG sont aussi immunostimulants grâce à des propriétés chimio-attractantes (via la production d'interleukine-8 : attraction de cellules phagocytaires, migration de neutrophiles), présentatrices d'antigènes et antibactériennes. Ils constituent de fait un élément de la réponse immune innée non spécifique. Parallèlement à ces AG courts et moyens, il existe des molécules saturées à longue chaîne comme l'acide laurique (C12 : 0), l'acide myristique (C14 : 0), l'acide palmitique (C16 : 0). L'excès d'apport de ces trois AG est délétère pour le corps car il favorise l'hypercholestérolémie, les maladies cardiovasculaires (l'acide myristique serait le plus délétère). L'acide palmitique entre dans la composition des TG de réserves des adipocytes. Son rôle n'est donc pas néfaste par lui-même car l'apport énergétique qui en découle est vital. Le problème réside dans le fait qu'il peut s'accumuler de manière aisée. Il est très présent dans les produits alimentaires manufacturés qui sont consommés de manière importante dans nos sociétés occidentales. En plus de cela, c'est le

premier à être synthétisé par le corps lorsque les apports en lipides, glucides et alcool sont trop importants. Cette double origine signifie que sa limite d'apport alimentaire est rapidement dépassée. Un AG à longue chaîne comme l'acide stéarique (C18 : 0) ne posent à priori pas de problème particulier, des molécules à très longues chaînes (C>20) entrent même dans la composition des gaines de myéline [ANSES, 2010] [CHENG, LI, MA *et al.* 2013] [DUBOIS, BRETON, LINDER *et al.*, 2008] [MORIN ET PAGES-XATART-PARES, 2012] [MOSONI, 2014] [POUILLART, 1998].

Les Acides gras mono-insaturés (AGMI)

Cette catégorie d'AG comprend des molécules avec une longueur de chaîne variable et qui possèdent une seule double liaison : il existe les AG oméga 7 et oméga 9. Concernant les AG oméga 9, ils ont une double origine : exogène par l'alimentation et endogène par l'action d'enzymes (delta-9-désaturase) qui apportent une double liaison à certains AGS. L'acide oléique (C18 : 1 n-9) en est le chef de file. Il est le plus abondant dans les aliments, notamment les huiles végétales. Son nom provient d'ailleurs du mot latin *oleum* signifiant huile. Sa synthèse endogène via l'acide stéarique est également très importante. Il possède un rôle énergétique, de structure. L'acide oléique joue aussi un rôle fonctionnel bénéfique dans la diminution des taux de cholestérol et diminue les risques cardiovasculaires [ANSES, 2010].

Les acides gras polyinsaturés (AGPI)

Ce sont des molécules possédant plusieurs doubles liaisons au sein de leur chaîne carbonée. Plusieurs familles les composent mais seulement deux regroupent des composés essentiels. L'organisme ne possède pas les systèmes enzymatiques (élongase ou désaturase) qui permettent de tous les synthétiser. Il s'agit des AG oméga 6 et oméga 3 pour lesquels l'apport exogène est primordial.

Les omégas 6

La famille des AG oméga 6 contient l'acide linoléique (AL) de formule C18 : 2 n-6. Cet AGPI indispensable possède une fonction structurale car il est présent dans les phospholipides membranaires. Outre le fait d'être le plus petit AG de cette classe, il est aussi le précurseur à partir duquel les autres molécules de cette classe peuvent être synthétisées. L'organisme convertit au besoin l'AL en d'autres AG oméga 6, ces derniers sont donc considérés comme conditionnellement indispensables. L'acide arachidonique (C20 : 4 n-6) est particulièrement important car il possède de nombreux rôles physiologiques. Il est essentiel pour la structure membranaire des cellules (présence importante dans les phospholipides à ce niveau). Il permet l'effet barrière du tissu cutané et une bonne

cicatrisation. Il est précurseur des eicosanoïdes. Ces AGPI sont bien représentés dans l'alimentation surtout au niveau des huiles végétales. Le problème qui peut se poser n'est pas une carence mais à l'inverse un apport trop marqué menant à un déséquilibre entre les AG oméga 6 et les AG oméga 3. Ce déséquilibre peut entraîner la formation de métabolites pro-inflammatoires (accumulation de prostaglandines) au dépend des métabolites protecteurs issus des AG oméga 3. Ce fait peut accentuer et entretenir des phénomènes inflammatoires chez de nombreux sportifs de FA. Le caractère bénéfique des AGPI est donc à remettre dans un contexte d'apports adaptés. En les respectant, l'athlète profitera des bénéfices de chaque famille d'AGPI [DUBOIS, BRETON, LINDER *et al.*, 2008] [MORIN et PAGES-XATART-PARES, 2012].

Les omégas 3

La famille des AG oméga 3 est constituée par l'acide α -linoléique (ALA) de formule C18 : 3 n-3. Tout comme l'AL, il possède un rôle de précurseur et un caractère indispensable car il n'est obtenu que par un apport exogène. Il peut être converti par le système enzymatique de l'organisme pour obtenir d'autres AG oméga 3 (s'il est apporté en quantité suffisante). Il a une action bénéfique sur le cholestérol circulant et sur les TG. L'acide eicosapentaénoïque (EPA ; C20 : 5 n-3) est un oméga 3 à longue chaîne conditionnellement indispensable. Si l'alimentation n'en apporte pas suffisamment, il peut être synthétisé efficacement à partir de l'ALA. Il est important car comme l'acide arachidonique, il est à l'origine de la synthèse de certains médiateurs de la famille des eicosanoïdes. L'acide docosahexaénoïque (DHA ; C22 :6 n-3) est un AG qui possède une très longue chaîne carbonée avec de multiples doubles liaisons. Sa structure le rend particulier et réellement indispensable car contrairement à l'EPA, l'organisme ne peut le synthétiser par conversion à partir de l'ALA. Les dernières étapes enzymatiques amenant à son obtention peuvent être limitées, les réactions allant avec un bon rendement jusqu'à l'acide docosapentaénoïque (DPA ; C 22 :5 n-3). Il doit donc être apporté par l'alimentation. Le DHA est d'autant plus important que les rôles physiologiques qui lui sont attribués sont multiples et importants. Il entre dans la composition des phospholipides membranaires. Il apporte la fluidité nécessaire aux cellules neuronales afin qu'elles puissent transmettre les informations de manière correcte. Il permet le développement et le fonctionnement du système nerveux, des fonctions cognitives et visuelles. Il est précurseur de médiateurs comme les docosanoïdes qui ont des actions neuro-protectrices et anti-inflammatoires. C'est une molécule qui a des effets bénéfiques sur la prévention des cancers, des maladies cardiovasculaires (hypocholestérolémiant et hypotriglycéridémiant), du diabète de type II, de l'obésité [ANSES, 2010] [DUBOIS, BRETON, LINDER *et al.*, 2008] [MORIN ET PAGES-XATART-PARES, 2012].

Les Acide gras trans (AGT)

Cette famille regroupe des AG insaturés qui présentent au moins une double liaison en position trans. La définition de l'ANSES inclut les isomères de CLA (*conjugated linoleic acids*) qui ne seront pas abordés ici. Ces AG peuvent avoir une origine naturelle par le processus de biohydrogénation ruminale. Ils sont présents dans des produits comme la viande animale de ruminants, dans le lait (entre 3 et 4,5% des matières grasses totales) et les produits qui en dérivent comme le beurre. Ce sont d'ailleurs ces derniers qui contribuent à l'apport le plus important. Les AGT peuvent aussi provenir de procédés mis en place par l'industrie agroalimentaire, leur origine est dite technologique. Le processus d'hydrogénation des huiles en est responsable. Ces AGT se trouvent dans de nombreux produits manufacturés en quantités variables : les huiles hydrogénées, les margarines (les quantités dépendent de l'usage, du prix du produit, des normes en usage dans le pays de production), les plats préparés, certaines céréales, les viennoiseries, les gâteaux, biscuits et barres chocolatées, les pâtes à pizzas et snacks, les sandwichs, les graisses végétales *shortening*. Certains modes de cuisson (traitements thermiques) génèrent la production de ces AG : une cuisson trop forte des huiles végétales, la friture ou la cuisson en grillade des aliments.

Leur excès de consommation entraîne des effets délétères sur la santé. Les études confirment qu'un apport en AGT supérieur à 2% de l'AETQ entraîne une augmentation de l'incidence des pathologies cardiovasculaires. Cette notion est à relativiser pour les isomères de CLA et les AGT d'origine naturelle (études en cours). Les AGT suivent aussi les mêmes voies métaboliques que les autres AG (stockage, présence dans les phospholipides membranaires) et ils peuvent donc entrer en concurrence avec eux. C'est pour toutes ces raisons qu'il est nécessaire de diminuer l'apport des aliments riches en AGT d'origine technologique [ANSES, 2016b] [LEGER ET RAZANAMAHEFA, 2005].

c. Un mot sur le cholestérol

Le cholestérol est un lipide essentiel jouant un rôle structural et fonctionnel. Sa présence dans la bicouche lipidique des membranes cellulaires assure la fluidité et permet une bonne répartition des protéines membranaires. Il est aussi le précurseur de divers composés comme les hormones stéroïdiennes (testostérone), les acides biliaires, le cholécalférol. Le cholestérol a une double origine. L'alimentation en apporte des quantités plus ou moins importantes. Il est aussi synthétisé par l'organisme, c'est d'ailleurs via cette origine endogène que provient la plus grande partie du cholestérol de l'organisme. A ce niveau, il se présente sous différentes formes : libre au niveau des membranes cellulaires ou à la surface des protéines de transport ; sous forme de cholestérol estérifié (en majorité). C'est sous cette forme qu'il est stocké et transporté au centre des lipoprotéines. Le cholestérol extra hépatique peut retourner au foie via des lipoprotéines : les HDL (*High*

Density Lipoprotein) pour y être dégradé. Le cholestérol synthétisé au niveau hépatique, lui, peut se rendre dans différents tissus et cellules via les LDL/ VLDL (*Low-Density Lipoprotein/ Very Low-Density Lipoprotein*). C'est l'excès de LDL3 qui est à critiquer car il est à l'origine d'un risque de dépôt artériel de ce lipide en cause dans la pathologie athérogène. Cependant en quantité normale et suffisante, il est indispensable car l'organisme a nécessairement besoin d'en avoir afin d'apporter le cholestérol dans les tissus qui en demandent.

Un apport alimentaire un peu trop riche en cholestérol n'influencera que très peu la concentration sanguine de ce lipide. Le foie contrebalance l'apport excessif en réduisant la synthèse endogène (l'effet est également vrai dans l'autre sens). Ce fait est vérifié chez la plupart des individus en bonne santé, l'exception se situant chez les personnes diabétiques. Si vigilance il y a, elle doit concerner en premier lieu des paramètres qui provoquent une augmentation de la synthèse endogène de cholestérol. Il peut s'agir d'un excès de consommation d'AGS de type acide palmitique/myristique, d'AGT d'origine industrielle, une carence d'apport en AG oméga 3, toutes les habitudes alimentaires pouvant amener à un diabète de type II. Pour autant, l'objectif n'est pas de se servir de cette information comme prétexte pour consommer des aliments riches en cholestérol de manière irraisonnée. Il s'agit simplement de relativiser certaines idées reçues. Il est évident que les sportifs atteints d'hypercholestérolémie et les diabétiques doivent être très prudents et réguler leur apport. Pour ceux en bonne santé, les règles peuvent être assouplies. L'application pratique concerne surtout la consommation d'œufs car de nombreux sportifs de force y ont recours. Pour les athlètes en bonne santé, manger quotidiennement plusieurs œufs (jusqu'à 3 dans de nombreuses études) n'entraînera pas d'effets délétères. Si ce régime est mis en place, il doit être associée à un apport plus raisonné d'autres sources riches en cholestérol (viande, charcuterie, abats, beurre) [FULLER, SAINSBURY, CATERSON *et al.*, 2015] [JONES, 2009] [MENGUAL, 2012a] [NAU, NYS, YAMAKAWA *et al.* 2010] [VIRTANEN, MURSU ET VIRTANEN, 2016].

d. Besoins quantitatifs et qualitatifs en lipides du sportif de force

L'athlète de force a les mêmes recommandations d'apports qu'un adulte lambda dans les proportions de lipides à apporter vis-à-vis de son total calorique et de la répartition en AG. Cependant, il va devoir adapter les quantités de lipides en fonction de sa DEJ afin de couvrir ses besoins, de soutenir la production hormonale, d'assurer le fonctionnement correct de son système immunitaire. La qualité dans l'apport doit être respectée. Une carence d'apport en AG oméga 3 n'est pas envisageable pour le sportif à cause du contexte pro-inflammatoire, pro-oxydant dans lequel il évolue.

Les lipides doivent représenter 30 (limite inférieure) à 40% de l'AETQ (soit de 1 à 2 g/kg/j de lipides). La moitié de ce total doit provenir des AGMI (15 à 20% de l'AETQ), arrivent ensuite les AGS (8 à 12%) avec des conditions d'apports plus strictes et restrictives concernant les acides palmitique, myristique et laurique. Les montants d'apports pour les AGPI oméga 3 et oméga 6 ont été fixés à respectivement 1 et 4% avec une mention particulière pour le DHE et l'EPA : 250 mg par jour. Les AGT, non mentionnés, devront être inférieurs à 2% de l'AETQ. L'apport journalier recommandé pour le cholestérol se trouve aux alentours de 300 mg. La présence des lipides ralentit la vidange gastrique et l'assimilation des autres nutriments. Le sportif doit donc éviter d'en consommer juste avant et pendant un entraînement afin de ne pas retarder l'assimilation et la disponibilité des AA et des glucides [ANSES, 2011a] [VENESSION, 2011].

e. Tour d'horizon des aliments riches en lipides

Les corps gras

Huiles végétales alimentaires

Les huiles végétales contiennent en majorité des TG associés à des stérols végétaux. Elles sont aussi riches en composés anti-oxydants : des tocophérols (vitamine E), des caroténoïdes (trans β carotène, vitamine A), des composés phénoliques et des ubiquinones. En fonction du produit d'origine, de leur méthode d'obtention et des procédés de fabrication, leur composition globale et leur stabilité à la chaleur (point de fumée) sont différentes. Il existe plusieurs grandes catégories d'huiles en fonction du type d'AG dominant : la famille oléique ayant une majorité d'AGMI (olive, noisette, arachide) ; la famille linoléique ayant une majorité d'AGPI oméga 6 (tournesol, soja, pépin de raisin, germe de blé) ; la famille α -linoléique ayant une bonne quantité d'AGPI oméga 3 (lin, colza, noix, soja) ; la famille des AGS : palme (majorité d'acide palmitique), palmiste, coprah/coco (majorité d'acides laurique et myristique). La plupart des huiles végétales diffèrent des corps gras d'origine animale par le fait qu'elles possèdent une plus forte proportion d'AGPI, moins d'AGS et de cholestérol. La valeur calorique est identique et importante du fait de la proportion exclusive de : 900 kcal pour 100 grammes [ANSES, 2016a] [MORIN et PAGES-XATART-PARES, 2012].

Corps gras d'origine animale : beurre, crème, saindoux

Le beurre et les crèmes proviennent du lait. Ce sont des aliments plus riches en AGS, en cholestérol (223 mg pour 100 g de beurre 82%, 95 mg pour 100 g de crème fraîche 30%) que la plupart des huiles végétales. Ces produits sont aussi moins caloriques car ils ne contiennent pas que des lipides. Un beurre classique contient aux alentours de 80% de matières grasses apportant 750 kcal pour 100 g, une crème à 30% : 324 kcal pour 100 g.

Ces aliments sont les principaux pourvoyeurs d'AGT naturels chez l'adulte. Le beurre est également riche en vitamine A et contient de la vitamine E et D [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005].

Matières grasses végétales ou composées : les margarines

Les margarines sont des produits fabriqués industriellement à partir de matières grasses végétales. Une petite adjonction de matière grasse animale est possible. L'emploi d'huiles hydrogénées est fréquent. De nombreux additifs y sont incorporés comme des arômes, des colorants, des émulsifiants, des conservateurs, du sel, des vitamines. Les margarines ont des compositions en AG différentes d'une marque à l'autre. Elles présentent en moyenne plus d'AGPI, plus d'AGMI, moins d'AGS que le beurre, ne possèdent pas de cholestérol mais des stérols végétaux. Certaines margarines peuvent contenir une forte proportion d'AGT, des additifs et présenter un déséquilibre dans le ratio oméga 6/3. Ces inconvénients résultent de l'utilisation d'huiles à bas coûts et de procédés d'hydrogénations [FREDOT, 2005].

Quels choix de corps gras pour le sportif de FA ?

Les huiles sont utilisées en assaisonnement, pour la cuisson ou la friture. Le choix de l'huile sera basé sur sa composition en AG, sa stabilité à la chaleur, son goût. Pour l'assaisonnement, il faut essayer de privilégier les huiles riches en AGPI avec un bon rapport oméga 6/3. Celles qui présentent une teneur forte en oméga 9 conviennent aussi. A l'inverse, il faut éviter l'utilisation excessive d'huiles riches en AGS de type palmitique, myristique ou déséquilibré dans l'apport oméga 6/3. Les huiles de colza et de noix sont celles à privilégier : bonnes teneurs en AGMI et AGPI avec un rapport oméga 6/3 harmonieux. L'huile de lin a le meilleur profil mais son goût et son prix peuvent être des obstacles à sa consommation. L'huile d'olive vierge, de par sa richesse en oméga 9, convient également. Cette huile est neutre car même si elle n'apporte pas beaucoup d'AGPI, elle ne déséquilibre pas fortement le rapport oméga 6/3. Les huiles de tournesol, de pépins de raisin, très utilisées en France, sont riches en AGPI. Malheureusement, il s'agit presque exclusivement d'oméga 6. Pour la cuisson, il est nécessaire de tenir compte du point de fumée de l'huile. Il est inutile de choisir une huile avec la meilleure composition si cette dernière se dénature à la chaleur et produit des composés nocifs de type acroléine ou acrylamide. Les huiles raffinées et celles contenant le moins d'AGPI ont des points de fumées supérieurs (tournesol, arachide). L'huile d'olive et certaines huiles de colza raffinées peuvent convenir. Les huiles de fritures sont des produits beaucoup moins insaturés et plus stables à hautes températures (arachide, tournesol) [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005].

Le beurre peut être utilisé pour la cuisson mais ce n'est pas la meilleure option. Son point de fumée est bas, le rendant incompatible avec des cuissons à hautes ou moyennes températures (il noircit). Une margarine de haute qualité lipidique sans huiles hydrogénées est une option plus satisfaisante. Les graisses comme le saindoux et la graisse de canard ne sont pas des produits de consommation courante. L'utilisation de beurre et de margarine (réalisation de plats, nature) est possible mais doit être adaptée en fonction de l'ensemble du programme nutritionnel. Si le sportif consomme beaucoup d'aliments riches en AGS, il peut éventuellement se tourner vers une margarine riche en oméga 3 sans AGT.

Les lipides de constitutions

Beaucoup d'aliments contiennent des lipides en proportion et en qualité variables. Il convient pour le sportif de les connaître, l'objectif étant de venir compléter l'apport total de manière harmonieuse. Les lipides de constitution peuvent être d'origine végétale. Les fruits oléagineux comme les olives, les avocats, les noix de coco ainsi que les graines oléagineuses : amandes, noix, noisettes, noix de cajou en contiennent de bonnes quantités. Les graines d'autres plantes comme celles de chia en sont également richement dotées (surtout en oméga 3). De manière générale, ces aliments peuvent figurer dans l'alimentation quotidienne du sportif car ils contiennent de bons teneurs en AGMI et en AGPI. En fonction des apports caloriques à atteindre, consommer une poignée de graines oléagineuses plusieurs fois par jour permet d'apporter des AG omégas 9, 3 et 6 [ANSES, 2016a] [FREDOT, 2005].

Les lipides de constitution composent aussi des produits d'origine animale : le lait, les fromages, la viande, les poissons gras. Ces sources alimentaires sont plus riches en AGS que celles d'origine végétale, c'est pourquoi il est important de prêter attention aux quantités prises afin de ne pas dépasser les recommandations d'apports. Les produits laitiers présentent une répartition intéressante en AGS, ils contiennent une part non négligeable d'AG à chaîne courte comme l'acide butyrique ainsi que des AG à chaîne moyenne. Les teneurs caloriques et lipidiques sont variables dans les laits et les fromages si bien que le sportif voulant en consommer dispose d'un choix important. Il en est de même pour les viandes de boucherie. En moyenne, elles contiennent 10% de lipides, le bœuf et le mouton possèdent davantage d'AGS, le porc et le veau plus d'AGMI. Leur consommation doit se faire dans le respect des recommandations d'apports afin de limiter les éventuels risques de cancers et de pathologies cardio-vasculaires : 500 g de viande de boucherie par semaine, consommation occasionnelle de produits de charcuteries. Une catégorie d'aliments présente des lipides de constitution d'excellente qualité avec une composition en AG harmonieuse, ce sont les poissons semi-gras et gras. Le saumon, le thon rouge, la truite, la sardine, le maquereau, le hareng, l'anchois sont riches en lipides de la famille des AGPI oméga 3 avec

une quantité notable en DHA et EPA. L'importance de ces composés est telle, que l'athlète se doit de les intégrer dans son programme alimentaire. Au moins deux repas par semaine doivent contenir du poisson avec un équilibre entre poissons maigres et gras. Il lui est possible d'en consommer davantage mais il devra privilégier les poissons en début de chaîne alimentaire (limitation au niveau des poissons prédateurs) [ANSES, 2010] [ANSES, 2016a] [ANSES, 2016b] [FREDOT, 2005].

Les produits dérivés et aliments transformés

Un grand nombre d'aliments est fabriqué de manière artisanale ou industrielle en incorporant des corps gras (comme agent de texture par exemple). Il s'agit surtout des huiles végétales concrètes (solides à température ambiante) comme l'huile de palme (venant de la pulpe des fruits du palmier à huile), l'huile de palmiste (issue des graines du fruit du palmier à huile), de coprah (noix de coco). Les viennoiseries, gâteaux, biscuits, produits chocolatés, céréales industrielles, pâtes à tartiner, plats préparés, pizzas et sandwichs peuvent en contenir. En observant leurs compositions, ces aliments ne présentent pas un grand intérêt nutritionnel. Cette piètre qualité et la faible densité nutritionnelle doivent inciter les sportifs à limiter leur utilisation. L'objectif n'est cependant pas de bannir totalement cette catégorie de produits car il s'agit souvent d'aliments plaisir. Leur retrait pourrait être à l'origine d'une frustration amenant à une baisse des performances. Il est possible de les inclure dans un programme nutritionnel mais de manière raisonnée, en usage ponctuelle et en adaptant les quantités aux objectifs de poids du moment [FREDOT, 2005].

3. Les glucides

a. Généralités

Les glucides sont des macronutriments apportant 4 kcal/g, exception faite des polyols moins énergétiques. Ils portent différents noms : hydrates de carbones, saccharides ou encore *carbohydrates* en anglais. Plusieurs classifications existent et ont été établies à partir de leur degré de polymérisation (DP) (Tableau X), de leur structure ou de leur pouvoir sucrant [AFSSA, 2004].

Tableau X. Classification des glucides suivant leur DP et leur digestibilité [CEDUS, 2012]

	Sous-Groupes	Principaux composés
Glucides digestibles		
	Monosaccharides (1)	Glucose, galactose, fructose, tagatose
Sucres (DP*1 et 2)	Disaccharides	Saccharose (2), lactose, tréhalose, maltose, isomaltulose
Oligosaccharides (DP 3 à 9)	Malto-oligosaccharides	Maltodextrines
Polysaccharides (> 9)	Amidon (3)	Amylose, amylopectine, amidons modifiés
Sucres alcools ou polyols (4)	De type monosaccharidique	Sorbitol, mannitol, xylitol, érythritol
	De type disaccharidique	Isomalt, lactitol, maltitol
Glucides non digestibles		
Oligosaccharides (DP 3-9)	Autres oligosaccharides	Raffinose, stachyose, verbascose, Ajugose (α -galactosides), fructo-oligosaccharides, galacto-oligosaccharides
Polysaccharides (> 9)	Polysaccharides non amylacés	Cellulose, hémicellulose (ex : galactanes, arabinoxylanes), pectines, inuline, hydrocolloïdes (ex : guar)

Les appellations glucides lents et glucides rapides sont des termes désuets, il faut leur préférer les notions en liens avec la structure glucidique : glucides simples et complexes. Les glucides simples (sucres) sont composés des monosaccharides (MS) et des disaccharides (DS) avec l'ajout des polyols : glucose, saccharose, fructose, lactose notamment. Des aliments comme les fruits, le lait et ses dérivés (hors fromages), le miel, les produits sucrés transformés (sodas et sirops, pâtisseries, confitures, chocolats, glaces) et bien sûr le sucre de table (saccharose) issu de la betterave (non raffiné) ou de la canne (raffiné et non raffiné) en contiennent. Les glucides complexes couvrent les oligosaccharides (OS) et les polysaccharides (PS) avec en chef de file l'amidon en glucide assimilable. On en retrouve dans les féculents, les légumineuses, les tubercules, certains fruits. Le fait d'être simple ou complexe ne joue pas sur leur vitesse d'assimilation et sur leur biodisponibilité : les petites structures glucidiques ne seront pas forcément digérées plus vite. Il suffit de voir que des aliments contenant de l'amidon à forte proportion d'amylopectine comme du pain blanc ou des pommes de terre ont un index glycémique (IG) plus élevé que des fruits par exemple qui contiennent majoritairement des sucres simples comme du saccharose et du fructose. C'est pourquoi afin d'éviter les confusions, les termes glucides lents/sucres lents et glucides rapides/sucres rapides ne sont plus à utiliser. Il faut préférer parler de glucides associés à leur IG, charge glucidique ou index insulinémique [AFFSA, 2004] [CEDUS, 2012].

L'IG est un outil qui permet d'estimer le pouvoir d'un aliment à élever la glycémie. La valeur de référence est fixée à 100. L'IG des aliments glucidiques correspond à un pourcentage obtenu par comparaison avec cette valeur de référence. Trois catégories d'aliments ont été définies : les aliments à IG fort (>70) ; les aliments à IG modéré (55 à 69) ; les aliments à IG bas (<55). L'IG est un outil utile pour les sportifs car il permet de déterminer les stratégies alimentaires à mettre en place autour et pendant l'entraînement. Il présente aussi quelques inconvénients. Il n'est pas aisé de déterminer l'IG d'un repas entier car il ne correspond pas nécessairement à la moyenne des IG de chaque aliment présent. La

composition générale glucidique compte évidemment mais les caractéristiques de l'amidon, l'environnement alimentaire entourant les glucides influencent le temps de vidange gastrique et la vitesse d'assimilation. La nature des glucides module l'IG cependant ce n'est pas le seul facteur à le faire. D'autres mécanismes le font varier comme la cuisson qui impacte la structure spatiale de l'amidon et sa cristallinité (une sur-cuisson augmentant l'IG) ; les proportions d'amylose et d'amylopectine qui constituent l'aliment (le riz basmati a une plus forte teneur en amylose donc un IG moins élevé que les autres riz), ainsi qu'une préparation éventuelle comme le broyage (purée de pomme de terre a un IG plus haut que la pomme de terre) ; l'environnement des glucides et la composition de l'aliment qui modifient le temps de vidange gastrique et de digestion (présence de lipides, de fibres, de réseaux protéiques comme le gluten qui diminuent l'IG) [AFSSA, 2004] [CEDUS, 2012].

La notion de charge glycémique (CG) est aussi importante car elle apporte une rectification en prenant en compte la quantité de glucides consommés. Ainsi, l'ingestion d'une petite quantité d'un aliment à IG haut, par exemple, ne se répercutera pas de la même manière sur la glycémie et l'insuline qu'une prise plus importante. Une CG est élevée pour des valeurs supérieures à 20, modérée entre 11 et 19 et basse lorsqu'elle est inférieure à 10.

$$\text{CG} = (\text{IG} \times \text{quantité de glucides de la portion en g}) / 100$$

Enfin, l'index insulinémique (II) évalue l'impact de l'ingestion d'un aliment sur la libération d'insuline. Normalement et dans la plupart des cas, les valeurs d'IG et d'II se recoupent et sont proportionnelles. Mais il existe des exceptions, c'est le cas des produits laitiers comme les yaourts qui possèdent un IG modéré mais un index insulinémique très élevé.

Le glucose, le fructose et le galactose sont directement assimilables par l'organisme au niveau intestinal. Les autres glucides doivent préalablement subir des interventions enzymatiques afin d'être décomposés en MS. L'objectif de l'organisme est le maintien de l'homéostasie glucidique. Les voies métaboliques sont nombreuses, elles ont lieu au sein de différents organes (foie, muscles, cellules adipeuses et nerveuses et d'autres tissus) et dépendent des besoins de l'organisme et de l'état nutritionnel. Après un repas, le glucose arrivant dans la circulation portale est capté par le foie (oxydation ou stockage) ou passe directement dans la circulation sanguine pour être utilisé dans les tissus périphériques. La sécrétion d'insuline induite favorise la captation du glucose par les cellules et enclenche ou inhibe des voies métaboliques spécifiques : utilisation comme source d'énergie (oxydation lors de la glycolyse), stockage sous forme de glycogène (glycogénogenèse dans les muscles et le foie), transformation en TG dans les adipocytes et le foie (lipogenèse), inhibition des voies de formations endogènes du glucose. Ces processus assurent le maintien du fonctionnement énergétique des cellules et empêchent l'élévation ou le maintien d'une hyperglycémie potentiellement néfaste pour l'organisme. En phase post absorptive, la glycémie diminue entraînant une baisse de la sécrétion d'insuline et le glucagon augmente.

L'organisme doit maintenir l'homéostasie glucidique, pour se faire il va mobiliser les composés de réserves. Au niveau hépatique, le glycogène subit une hydrolyse pour donner du glucose lors de la glycogénolyse (mécanisme majoritaire). En parallèle, la lipolyse s'active entraînant la libération d'AG libres et de glycérol via les TG dans la circulation. Le glycérol est transporté par l'albumine sérique vers le foie, à ce niveau il est transformé en glucose via la néoglucogenèse. Aux niveaux musculaire et hépatique, la protéolyse augmente. Les AA provenant des muscles migrent dans le foie où ils permettent là aussi d'obtenir du glucose (néoglucogenèse). Ces deux mécanismes sont minoritaires dans les quelques heures qui suivent le dernier repas mais deviennent majoritaires lorsque le foie épuise ses dernières réserves de glycogène.

Le galactose et le fructose sont insulino-indépendants. Ils peuvent entrer dans les cellules sans l'intervention de cette hormone, ils ne déclenchent donc pas directement sa sécrétion. Le galactose est obligatoirement métabolisé en glucose au niveau hépatique et suit donc ses voies d'utilisations (glycolyse ou stockage sous forme de glycogène). Le fructose est quelque peu différent. Une fois dans la circulation portale, la plus grande majorité est captée par le foie. A ce niveau, il subit des phosphorylations différentes du glucose (système enzymatique non identique) [CEDUS, 2012].

b. Rôles des glucides et leurs intérêts pour le sportif de force athlétique

Les glucides ont essentiellement un rôle énergétique. Le glucose disponible au sein de l'organisme, libre ou sous forme de glycogène, est utilisé comme substrat énergétique pour supporter l'activité neuronale et musculaire. C'est le carburant principal du corps. Cette fonction est en lien avec sa deuxième propriété : la présence de glucides épargne l'utilisation des protéines et des AG à des fins énergétiques. Enfin, ils ont un rôle structural, certains d'entre eux sont des constituants de molécules importantes pour l'organisme comme le ribose pour les acides nucléiques. La FA n'entraîne pas les mêmes besoins, ni les mêmes motifs d'utilisations des glucides que les sports d'endurances. Tout simplement car l'effort de force demande une utilisation et un débit d'oxydation du glucose différents d'un effort d'endurance. Le glucose sanguin, les réserves de glycogène musculaires sont moins impactées : il y a moins de problèmes d'hypoglycémies. Cela ne signifie pas pour autant une inutilité des glucides. Même si les muscles utilisent préférentiellement la filière anaérobie lactique pour fournir de l'ATP, les autres voies s'enclenchent également. Ce phénomène est d'autant plus marqué lorsque les séances sont longues, dépassent une certaine durée (au-delà d'une heure) et quand le volume d'entraînement est important. Il est possible d'observer une déplétion des stocks de glycogène musculaire de l'ordre de 20 à 40% en post-effort de force [AFFSA, 2004] [CEDUS, 2012] [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [SLATER ET STUART, 2011].

Le sportif doit choisir avec intelligence ses sources glucidiques et les répartir de la meilleure façon dans la journée et autour de l'entraînement. Un choix judicieux permet de maintenir les performances tout au long de l'entraînement surtout si la durée, l'intensité et le volume de travail sont importants; limiter le catabolisme car la glycémie impacte l'imprégnation hormonale du muscle en freinant l'augmentation du taux de cortisol circulant ; favoriser la récupération et les synthèses protéiques car une déplétion trop importante des réserves de glycogène musculaire ralentie ces phénomènes (l'organisme priorise la remise à niveau de ces stocks de glycogène à leur dépend) [AFSSA, 2004] [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [RICHE, 2005] [TIOLLIER, 2015].

c. Besoins quantitatifs et qualitatifs

La couverture des besoins en glucides doit être adaptée en fonction des objectifs de poids, des apports en protéines et en lipides de l'athlète. Lors de l'établissement d'un plan alimentaire, la couverture énergétique pour les protéines et les lipides est stable. Cela est nécessaire afin de conserver un bon statut hormonal et de maintenir voire d'améliorer le capital musculaire. Une fois que leurs quantités ont été définies, les glucides viennent compléter le total calorique quotidien. Ils représentent le macronutriment sur lequel s'appuie le sportif afin d'atteindre ses objectifs de poids. S'il veut perdre de la masse, il devra d'abord diminuer les quantités de glucides et inversement pour une prise de poids. Les quantités de lipides et de protéines suivent l'évolution du poids corporel de l'athlète mais sans pour autant être à l'origine de la démarche. L'ANSES fournit des recommandations générales pour l'apport glucidique des sportifs : entre 4 et 12 g/kg/j représentant entre 50 et 70% de l'AETQ. Aucune distinction n'est faite cependant entre les sports d'endurance et de force. Une adaptation est donc obligatoirement nécessaire. Dans le cadre de la FA, les protéines représentent une part plus importante du total. Dans le même temps, il faut respecter les recommandations d'apports pour les lipides. En suivant ces règles, les glucides doivent se situer dans la tranche basse de ces recommandations. Certaines études et recommandations étrangères confirment cela et indiquent que les apports peuvent se situer entre 4 et 7 g/kg/j [SLATER ET STUART, 2011].

Les sources glucidiques doivent être variées et surtout adaptées en fonction du moment de la journée. L'athlète doit privilégier des aliments à IG bas et modéré loin des entraînements. L'objectif est d'éviter des pics de sécrétion d'insuline. Le maintien d'une sécrétion stable favorise le stockage énergétique des glucides sous forme de glycogène et non pas de TG et réduit le risque d'apparition d'une résistance cellulaire à cette hormone. En se rapprochant du début de la séance sportive, les repas ou collations pourront comporter des aliments glucidiques digestes à IG un peu plus élevé. L'objectif est d'avoir une glycémie optimale afin de mettre à disposition des muscles les éléments énergétiques nécessaires

lors de l'effort. Attention toutefois à ne pas consommer des aliments à IG trop élevé trop loin du début de la séance afin d'éviter une hypoglycémie réactionnelle lors de la séance. Un apport en quantités raisonnables se justifie. Il faut éviter une prise concomitante de fibres et de lipides afin de ne pas perturber leur assimilation et d'entraîner une possible baisse des performances à cause d'une digestion trop lourde (sang moins disponible pour les muscles). Une boisson de l'effort avec des glucides à IG haut peut être envisagée lors d'entraînements longs. Ces glucides permettront de : maintenir les performances et la glycémie ; de lutter contre la production de cortisol ; de ralentir la déplétion des stocks de glycogène amenant à une meilleure récupération et une balance protéique positive. Après l'effort, si ce protocole est correctement suivi les stocks de glycogène sont relativement épargnés. L'ingestion de protéines en quantités suffisantes directement après une séance suffit à provoquer une réponse insulinémique satisfaisante. Si l'alimentation a été correcte avant et pendant la séance, une ingestion rapide de glucides à IG haut n'est pas justifiée. Dans le cas contraire, si les réserves de glycogène sont impactées, un apport en glucides peut avoir lieu. Là encore, des aliments à IG modéré suffisent car la resynthèse de glycogène durant la première heure post-effort ne dépend pas de l'insuline (elle le devient par la suite en s'étendant sur plusieurs heures : resynthèse bi-phasique). Le repas faisant suite à l'entraînement est capital. Il se doit de contenir une quantité suffisante de glucides à IG modérés ou bas et de protéines afin d'apporter les calories et les éléments nécessaires à la récupération et à la croissance musculaire [GREENHAFF, KARAGOUNIS, PIERCE *et al.*, 2008] [HULMI, LAAKSO, MERO, *et al.*, 2015] [JENTJENS ET JEUKENDRUP, 2003] [VENESSION, 2011].

Une restriction d'apport existe et elle concerne les produits à sucres simples ajoutés qui sont la plupart du temps d'origine industrielle comme les pâtisseries, les confiseries, les crèmes desserts, les glaces, les jus de fruits, les céréales du petit déjeuner, les biscuits et les sodas. La faible densité nutritionnelle de ces aliments et le fait que leur surconsommation puisse engendrer diverses pathologies (obésité, diabète de type II, maladies cardiovasculaires, phénomènes inflammatoires, suroxydation) ont conduit les instances sanitaires à fixer une limite d'apport à 10% de l'A.E.T.Q. [AFSSA, 2004].

d. Les choix alimentaires du sportif de force athlétique

Les sources de glucides complexes : les féculents

Les féculents représentent l'une des principales sources énergétiques alimentaires pour l'Homme. La ration glucidique nécessaire à l'athlète de FA doit provenir en grande partie de cette catégorie d'aliments. Cette classe regroupe, de manière simplifiée, des aliments d'origine végétale ayant une proportion notable d'amidon ou de glucides

complexes. Elle contient les céréales sans distinction de familles botaniques : blé, riz, avoine, maïs, épeautre, millet, orge, seigle, sorgho (poacées/ graminées), sarrasin (polygonacées), quinoa (chénopodiacées) ; les produits transformés qui dérivent des céréales (farine, pain et produits de panification, féculé, pâtes, semoule, boulgour) ; certains fruits : les bananes desserts (non mûres), les bananes plantains (à cuire), les fruits amylicés comme les châtaignes et les marrons ; les légumineuses comme les fèves, les lentilles, les pois et pois chiches, les haricots secs et demi-secs (rouges, blancs, flageolets entre autres), les graines de soja ; les tubercules comme la pomme de terre, la patate douce, le manioc, l'igname, le topinambour et les produits qui en dérivent. Les quantités de glucides, l'IG et la densité nutritionnelle diffèrent d'un aliment à l'autre. Ils dépendent évidemment des caractéristiques du produit de base et des éventuelles transformations réalisées afin d'obtenir le produit dans l'assiette (raffinage, usinage, mode de cuisson et de préparation). Les données concernant les quantités de glucides des féculents sont disponibles sur la table CIQUAL, attention toutefois à faire la distinction entre aliments cuits et crus [FREDOT, 2005].

Le sportif dispose d'un choix très large d'aliments à sa disposition pour établir son apport en glucides complexes. Tous les féculents ne se valent pas sur le plan quantitatif et c'est également le cas concernant leurs IG et leurs valeurs micronutritionnelles. Il est nécessaire de choisir sa source de glucides en prenant soin de faire corrélérer l'IG avec le moment de prise. Les vertus nutritionnelles et l'atout santé des produits sont aussi à prendre en compte. Le riz possède des valeurs nutritionnelles et un IG qui diffèrent en fonction de la variété consommée et de l'usinage opéré sur les grains. Un riz brun complet ou étuvé contient plus de minéraux (manganèse, sélénium), de fibres et de vitamines B qu'un riz blanc minute. L'IG est également plus bas comme pour le riz basmati (plus forte proportion d'amylose). Le blé tendre et les produits qui en dérivent (farines, pains) illustrent aussi cette diversité nutritionnelle. Le raffinage est plus ou moins poussé en fonction du produit final souhaité. Lorsqu'il est moindre et que la plus grande partie du grain est conservé (taux de cendres et d'extraction élevés), les farines obtenues (T170, T150 voir T110) et les pains sont dits complets. Ces derniers sont riches en fibres, en vitamines, en minéraux et ont un IG modéré. Il en est de même pour des pains contenant d'autres céréales (seigle, épeautre). A l'opposé, un raffinage accentué permet d'obtenir des farines blanches (T45 ou 55) qui sont grandement débarrassées de l'écorce (les taux d'extractions et de cendre sont plus faibles) et sont donc plus pauvres en micronutriments. La différence d'IG entre un pain blanc et complet provient du fait que la baguette contient plus de glucides, moins de fibres et de protéines et que le mode de préparation, essentiellement la cuisson en milieu humide, modifie les caractéristiques de l'amidon (gélatinisation puis dextrinisation de ce glucide). D'une manière générale, un usinage intense provoque la dénaturation de l'aliment et une perte de son intérêt nutritionnel. Ces constatations se retrouvent dans de nombreux cas,

pour le riz, le blé (les produits de la panification, les pâtes alimentaires), les pommes de terre (nature, transformées en flocons/ purée/ frites /chips) [AFSSA, 2004] [FREDOT, 2005].

Les glucides simples : l'importance des fruits et des légumes

La première famille rassemble les fruits, certains légumes racines (betteraves, carottes) et légumineuses (petits pois), le lait et les produits laitiers (hors fromages). Concernant le lait, il contient environ 5% de sucres principalement sous forme de lactose. Il est une source importante de calcium et de phosphore, ces deux minéraux étant très bien absorbés (rapport calcium/phosphore supérieur à 1). Une présence notable de vitamines hydrosolubles comme la B2 et la B12 est à noter. Son utilisation dépend essentiellement de la tolérance digestive du sportif. Les fruits frais ont une teneur moyenne en sucres simples (mélange de saccharose, fructose et glucose) de 12%, cette présence est moins marquée pour les légumes (exception faite de certains légumes racines : carottes, betteraves). Ils sont riches en eau donc peu caloriques, possèdent une forte présence de vitamines, de fibres et de minéraux. Leurs propriétés basifiantes et anti-oxydantes sont de précieux alliés pour l'athlète de force. Les fruits et légumes possèdent des densités nutritionnelles tellement fortes, que leur absence au sein d'un programme alimentaire sportif est inenvisageable. A quelques exceptions près, ils ont des IG bas (IG modéré : fruits : raisin, melon, figue, ananas, banane mûre et légumes : betterave cuite ; IG haut : datte, pastèque, potiron, panais). Les fruits secs sont aussi une source glucidique intéressante pour le sportif. La perte d'eau engendre une concentration des glucides présents et également une augmentation de leur charge calorique. L'éventail de choix est large, l'idéal étant de choisir des produits de saison et un mode de préparation et/ou de cuisson adaptée [FREDOT, 2005].

La seconde famille regroupe des produits plus pauvres nutritionnellement (certains aliments à « calories vides »). Cette catégorie englobe le sucre de table et ses dérivés, les aliments transformés industriellement contenant des sucres ajoutés comme les boissons sucrées, les confitures, les pâtisseries, les confiseries, le chocolat et les barres chocolatées, les desserts lactés, les crèmes desserts et les glaces. Elle contient aussi certains aliments qui peuvent avoir une image nutritionnelle positive alors qu'en réalité le raffinage et l'usinage qu'ils ont subis, les ont privés d'une grande partie de leurs intérêts : certains jus de fruits, les céréales du petit déjeuner, les barres de céréales, les compotes industrielles. Au même titre que les aliments plaisirs évoqués lors de la partie sur les lipides, l'athlète ne doit pas les supprimer totalement mais juste les utiliser avec parcimonie. Une recommandation est fixée à 10% de la contribution énergétique maximale que ces produits sucrés doivent apporter [AFSSA, 2004].

Les compléments glucidiques et la boisson de l'effort

Comme pour les protéines, des compléments glucidiques existent (je passe outre les compléments dits *gainers*). Ils se rencontrent sous forme de boissons glucidiques de l'effort ou bien de poudres. L'athlète peut y avoir recours dans des situations où l'utilisation d'aliments solides est délicate. C'est le cas lors d'un entraînement long et intense qui n'a pas été précédé d'une collation. L'objectif est de fournir des glucides à haut IG et facilement assimilables. Pour ce faire, le sportif peut s'hydrater avec des boissons isotoniques ou hypotoniques prêtes à l'emploi ou bien fabriquées par ses soins. Les boissons énergétiques hypertoniques ne sont pas recommandées car elles sont trop concentrées en glucides. Leur consommation entraînerait une déshydratation compensatrice par transfert d'eau vers l'intestin. Faire soi-même sa boisson est possible mais quelques règles sont à suivre. La concentration en glucides peut varier mais ne doit pas excéder 6%. Libre au sportif d'adapter cette quantité et de ne pas dépasser 60 g par litre d'eau. Quoi qu'il en soit, l'athlète doit augmenter les quantités de glucides de manière progressive afin d'éviter tout problème d'intolérance digestive. Le choix des glucides en poudres à IG haut est aussi à considérer. Il existe actuellement sur le marché une offre pléthorique. Le plus souvent les produits se présentent sous forme de mélanges de poudres plus ou moins adaptés. L'idéal est de choisir un produit digeste et qui correspond à son budget. Le saccharose (sucre de table), le fructose en poudre ne sont pas les plus adaptés : IG et digestibilité non adaptés. Le glucose en poudre (*dextrose* en anglais) est le glucide de premier choix : IG haut et bas prix. Toutefois, il peut se révéler trop sucré en goût et moyennement digeste. La maltodextrine est un produit avec un bon rapport qualité/prix. Ce PS de glucose (résultant de l'hydrolyse d'un amidon ou d'une fécule) a de nombreux atouts : IG très haut, prix correct, bonne digestibilité et goût modérément sucré. L'amidon de maïs comme le *waxy maize* et le vitargo (produit breveté) sont des alternatives à la maltodextrine. Le vitargo est le plus onéreux, il présente l'assimilation la plus rapide ainsi qu'une excellente digestibilité [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [ROBERT, 2016] [VENESSION, 2011].

C. Fibres et micronutriments au service du sportif

Un apport optimal en fibres, en vitamines, en minéraux et oligo-éléments est d'une grande importance pour l'athlète. Avant même de s'intéresser aux micronutriments, il est nécessaire d'étudier le système par lequel ils sont assimilés. C'est pourquoi, le premier thème à aborder est le maintien d'un système digestif de qualité par une alimentation adéquate riche en fibres. Par la suite, nous aborderons certains micronutriments : le magnésium et la vitamine D, ainsi que les composés anti-oxydants. Il est impératif de

considérer l'activité sportive et l'augmentation de la DEJ comme des éléments qui influencent les besoins de l'individu. L'élévation du métabolisme (hypertrophie, régénération des microlésions), les pertes en électrolytes par la transpiration, le stress oxydant sont autant de raisons d'une utilisation plus importante de micronutriments. C'est pour cela que des coefficients correcteurs, dépendant notamment de la dépense calorique et du type de sport, doivent être appliqués aux ANC de ces composés. Ne pas en tenir compte lors de la planification de son programme alimentaire est une erreur qui se répercutera sur les performances générales de l'athlète et sur sa santé. Un apport inadapté ne permettra pas de lutter contre l'installation progressive d'un déséquilibre de l'homéostasie se manifestant par un stress oxydant, une acidification, des phénomènes inflammatoires chroniques, une fatigue nerveuse, une baisse de l'immunité. La démarche globale, afin de prévenir tout problème, doit laisser une place importante aux aliments à fortes densités nutritionnelles, fruits et légumes en tête.

1. Les fibres au service du système digestif

Entretenir le système digestif est un pré requis obligatoire pour s'assurer de la bonne tenue des phases de progressions et de l'alimentation mises en place. L'athlète ne sera pas en mesure d'assimiler correctement les calories, les macronutriments et micronutriments avec un intestin défaillant. L'apport quotidien optimal en fibres est estimé entre 25 et 30 grammes. Pour rappel, les fibres alimentaires sont des glucides complexes qui ne peuvent pas être digérées et absorbées par l'organisme, ce dernier ne disposant pas du système enzymatique nécessaire. Elles ne sont pas considérées comme des nutriments [MOSONI, 2014] [VENESSON, 2011].

a. Les fibres insolubles

Les fibres insolubles sont des composés qui ne se dissolvent pas dans l'eau, elles comprennent la cellulose, la plupart des hémicelluloses, la lignine. Leur présence est notable dans les céréales complètes et les produits dérivés complets (pain, son, pâtes), les légumineuses (lentilles, haricots rouges et blancs, pois chiche), les fruits secs et frais (baies, fruits de la passion, figues, pruneaux, dattes), les légumes (artichauts, choux de Bruxelles, haricots verts, céleri), les graines oléagineuses (amandes, pistaches, noix du Brésil, cacahuètes). Elles ont la capacité d'absorber l'eau et de gonfler mais de manière variable en fonction de leur capacité de rétention. La flore intestinale ne peut pas les digérer, elles vont donc parcourir le système digestif de manière inchangé. Ces fibres ont un rôle mécanique dans le déplacement des aliments et sont utiles pour lutter contre la constipation. Dans l'estomac, elles augmentent le volume du bol alimentaire et jouent donc un rôle sur le phénomène de satiété. Au niveau intestinal, elles assurent un transit de bonne qualité par

une stimulation de la motricité intestinale et une hydratation correcte des selles. Le fait d'avoir un déplacement régulier et constant entraîne également un temps de contact plus faible entre la muqueuse du côlon et le contenu digestif, ce qui peut être un facteur protecteur contre des pathologies comme le cancer du côlon. Chez les sportifs de force qui consomment beaucoup de viandes rouges, un apport adéquat en fibres paraît donc plus que nécessaire : entre 15 et 20 grammes par jour. Attention toutefois à l'excès, elles peuvent être irritantes chez des individus sensibles ou présentant des colopathies [VENESSON, 2011].

b. Les fibres solubles

Les fibres solubles ont la capacité de se disperser dans l'eau, ce qui signifie qu'elles épaississent le milieu humide dans lequel elles se trouvent en augmentant de fait la viscosité. Il s'agit de composés comme le galactomannane (gomme arabique, guar, caroube), le glucomannane (konjac), les pectines (fruits frais et séchés : pommes, coings, oranges, prunes, groseilles, citrons, pamplemousses), les légumes (carottes, haricots verts, pois, aubergines, courgettes, concombres), les mucilages (psyllium de la guimauve, du plantain), les alginates et carraghénanes des algues (fucus, laminaires), l'agar-agar, les β -glucanes (avoine et orge), certaines hémicelluloses, les fructanes avec l'inuline (chicorée, pissenlits, artichauts, topinambours, oignons, bananes, ail, asperges) et les fructo-oligosaccharides (FOS). Cette propriété de former des gels en milieu humide présente plusieurs avantages. Tout d'abord, cela permet une protection des muqueuses par un effet barrière. Ensuite, cette viscosité entraîne un ralentissement du temps de vidange gastrique ainsi qu'un ralentissement du travail enzymatique et de la digestion des glucides. L'effet métabolique est double : d'une part, cela se répercute positivement sur la satiété et d'autre part, la présence de fibres diminue l'IG des aliments et la réponse insulinémique postprandiale. Les fibres solubles comme celles contenues dans les gommages et les β -glucanes ont aussi des effets hypotriglycéridémiant et hypocholestérolémiant. Elles peuvent séquestrer les sels biliaires ce qui entraîne leur élimination digestive en lieu et place de leur réabsorption. L'organisme doit donc utiliser plus de cholestérol afin de les renouveler. Les fibres diminuent aussi l'accessibilité des TG et du cholestérol lors des phénomènes d'émulsifications. Les fibres solubles sont aussi fermentescibles, certaines populations bactériennes anaérobies du côlon peuvent les utiliser comme substrat énergétique par le biais de la fermentation colique. Ce phénomène permet leur croissance et leur développement. L'augmentation de la masse bactérienne permet une régulation du transit intestinal mais de manière plus douce que les fibres insolubles. Cela empêche aussi l'implantation de bactéries potentiellement pathogènes (rôle immunitaire). Les prébiotiques (inuline, FOS) sont particulièrement utilisés par la flore de fermentation dans le côlon ascendant ce qui engendre sa prolifération. De par leur métabolisme, il y a une production

de gaz et d'AG à chaînes courtes (acides butyrique, propionique et acétique) avec une diminution notable du pH. Les effets bénéfiques sont nombreux : renforcement de la muqueuse avec un bon développement des colonocytes, immunité renforcée, diminution des phénomènes allergiques, protection contre les maladies inflammatoires digestives et le cancer du côlon, meilleure assimilation des minéraux (calcium, magnésium, fer) et des vitamines (B12 notamment), meilleur contrôle de la glycémie, de l'obésité et du profil lipidique, synthèse de certaines vitamines (K, B8). Un apport de 10 à 15 g quotidien est recommandé [MOSONI, 2014] [VENESSION, 2011].

2. Les principaux micronutriments au service du sportif de force

Les micronutriments regroupent les nutriments assimilés par l'organisme mais qui ne lui apportent pas d'énergie. Ils sont composés des vitamines hydrosolubles (celles du groupe B et la vitamine C), liposolubles (vitamines A, D, E, K), des sels minéraux majeurs (calcium, phosphore, potassium, magnésium, sodium), des oligo-éléments présents en plus faibles quantités (fer, chrome, zinc, sélénium, cuivre, cobalt, chlore, fluor, manganèse, nickel par exemple). Ils incluent même des AA et des AG essentiels que nous avons étudiés précédemment. L'alimentation est capitale car notre corps ne peut synthétiser ces composés (exception faite des vitamines K et D), c'est elle qui permet de les apporter. L'objectif n'est pas de retracer et de détailler l'ensemble de ces micronutriments mais de s'intéresser à ceux particulièrement intéressants pour le sportif de force. Quantifier et mesurer l'impact de l'activité physique de force sur chaque micronutriment n'est pas chose aisée. Mais même sans référence précise, il paraît logique pour l'athlète de mettre en place une alimentation qui permettra d'atteindre au minimum les chiffres édités pour la population générale. Un coefficient correcteur pourra être appliqué par rapport à l'ANC standards des vitamines et minéraux (Figure 11). Afin d'atteindre ces recommandations, il est nécessaire de privilégier des aliments à haute densité nutritionnelle. Parallèlement à cela, la connaissance des facteurs pouvant influencer l'assimilation de certains micronutriments servira à limiter l'apparition de carences [BERDANIER, DWYER ET HEBER, 2014].

Vitamines et minéraux	Sexe ^a	ANC ^b	Apport Nutritionnel Complémentaire ^c	Limite supérieure conseillée, tous apports compris
Thiamine (mg) Vitamine B1	H / F	1,3 / 1,1	1,0 (1,5) ^e	10 ^d
Riboflavine (mg) Vitamine B2	H / F	1,6 / 1,5	1,0	10 ^d
Niacine (mg) Vitamine B3/ PP	H / F	14 / 11	2,5	30
Pyridoxine (mg) Vitamine B6	H / F	1,8 / 1,5	1,0 (2,0) ^h	7,5
Biotine (µg) ⁱ Vitamine B8	H , F	50	-	-
Folates (µg) Vitamine B9	H , F	330 / 300	100	600 (1 000) ^b
Vitamine B12 (µg)	H , F	2,4	1,5	5 ^d
Vitamine C (mg)	H , F	110	100	600
Vitamine A totale (µg ER)	H / F	800 / 600	200	1 800
Dont â-carotène (µg) ^e	H / F	2 400 / 1 800	1 000	8 400
Vitamine D (µg)	H , F	5 (10) ⁱ	4	20
Vitamine E (mgr équivalents RRR- â-tocophérol)	H , F	12	12	50
Acide pantothénique (mg) ^f	H , F	5	-	-
Vitamine K (µg) ^g	H , F	45	-	-
Fer (mg)	H / F	9 / 16	6	28
Zinc (mg)	H / F	12 / 10	1	15
Sélénium (µg)	H / F	60 / 50	30	150
Cuivre (mg)	H / F	2,0 / 1,5	0,6	3,5
Manganèse (µg)	H , F	1 – 2,5	0,6	3,5
Chrome (µg)	H / F	65 / 55	20	120
Iode (µg)	H , F	150	50	300

- a. H = hommes ; F = femmes ; ces valeurs sont établies pour un homme « moyen » mesurant 1,75 m et pesant 70 kg et une femme « moyenne » mesurant 1,62 m et pesant 55 kg . Des corrections pourront être faites en fonction du poids et de la taille .
- b. ANC = Apports Nutritionnels Conseillés pour la population sportive ayant une activité physique occasionnelle ou modérée .
- c. Coefficient correcteur : quantité de vitamine ou minéral devant être ajouté à l'ANC (colonne 1) par tranche de 1000 kcal dépensée au dessus de 1 800 kcal.j⁻¹ chez la femme et de 2 200 kcal.j⁻¹ chez l'homme ;
- d. Pour quelques vitamines et minéraux une limite de sécurité n'a pas été définie . La valeur inscrite dans cette colonne correspond à la dose maximale « utile », c'est à dire la dose maximale absorbée par jour .
- e. L'apport conseillé en â-carotène est exprimé en îg de â-carotène en sachant que 2 400 îg de â-carotène correspondent à 400 îg d'équivalents rétinol .
- f. En l'absence d'effet démontré sur les métabolismes énergétiques et la performance, il n'a pas été défini d'ANC spécifique pour les sportifs . La valeur de référence pour les sportifs correspond à l'ANC pour la population ayant une activité physique modérée .
- g. Lors d'apports glucidiques élevés (10-12 g.kg⁻¹.j⁻¹)
- h. Lors d'apports protidiques élevés (2 à 3 g.kg⁻¹.j⁻¹)
- i. Apport conseillé de novembre à mars

Par manque de données chez le sportif aucune recommandation particulière ne peut être formulée concernant les autres éléments traces .

Figure 11. ANC en vitamines et minéraux chez l'adulte et réévaluation chez le sportif [AFSSA, 2000]

a. Le magnésium : un minéral indispensable

L'étude du magnésium n'est pas anodine. Elle est nécessaire pour deux raisons : d'une part, car le sportif de force présente forcément des besoins plus importants au vu du rôle de ce minéral dans le métabolisme énergétique et d'autre part, car beaucoup d'individus peuvent présenter des carences. L'étude SU.VI.MAX a d'ailleurs démontré un apport en magnésium insuffisant chez plus des trois quarts des français. Pour toutes ces raisons, il est utile de définir l'alimentation à adopter ainsi que quelques règles simples à suivre. Avant de commencer, il est bon de rappeler que l'apport quotidien recommandé est fixé à 420 mg pour l'homme et 360 mg pour la femme (6 mg/kg/j) [BERTHELOT, ARNAUD, REBA *et al.*, 2004] [PERIAULT, 2011].

Ce minéral est un composé ubiquitaire, cela signifie qu'il est présent à de nombreux endroits au sein de l'organisme. Il se retrouve particulièrement au niveau osseux, le reste

étant concentré au sein des cellules nerveuses et musculaires. Sa présence est très faible au niveau sanguin. Environ 1% de la quantité totale s'y trouve et elle est en grande partie contenue dans les érythrocytes. L'organisme ne dispose pas de réserves considérables, environ 24 g pour un adulte. Sa faible représentativité quantitative ne l'empêche pas d'être un composé extrêmement important avec de nombreuses fonctions. Le magnésium est un minéral essentiel de par son rôle de cofacteur enzymatique (kinases, cyclases, ATPases membranaires). Il est impliqué dans plus de 300 réactions enzymatiques. Ce minéral a la particularité d'interagir avec les molécules possédant des groupements phosphatés comme l'ATP, l'ADP, l'ADN, l'ARN. Par exemple, l'ATP le chélate formant un complexe plus stable : le Mg-ATP. C'est ce dernier qui est le véritable substrat des diverses réactions de l'organisme. Ces caractéristiques expliquent son utilité lors des réactions bioénergétiques au sein des cellules ou dans le métabolisme des macronutriments. Il peut aussi interagir avec le phosphore et surtout le calcium. C'est le magnésium qui permet la fixation de calcium au niveau osseux, c'est donc un composé essentiel pour la croissance et la protection du capital osseux (minéralisant et anti-décalcifiant). Il est aussi actif dans le métabolisme calcique via son action au niveau des glandes parathyroïdes. Au sein des cellules, le magnésium peut réguler et inhiber les mouvements transmembranaires du calcium. C'est également le cas avec l'acétylcholine au niveau des jonctions neuromusculaires. De fait, il diminue l'hyperexcitabilité des cellules musculaires et nerveuses : propriétés myorelaxantes et apaisantes. C'est pour ces raisons qu'un manque de magnésium est souvent associé à des problèmes comme de l'anxiété, de l'irritabilité, de la nervosité, des troubles du sommeil, des palpitations, des crampes. Pour terminer, il est aussi protecteur pour le système cardiovasculaire où il régule la conduction cardiaque et a un effet vasodilatateur. Il a des vertus anti-inflammatoires, anti-allergiques et stimule le système immunitaire grâce à son rôle de coenzyme lors des réactions de synthèse des anticorps et par son action sur la libération de cytokines [BERTHELOT, ARNAUD, REBA *et al.*, 2004].

Le magnésium est très présent dans des aliments comme les algues marines séchées (wakamé : 1110mg/100g ; fucus : 885mg/100g ; nori : 486mg/100g ; spiruline : 195mg/100g), le cacao (511mg/100g) et les produits qui en contiennent comme le chocolat (chocolat noir à 70% : 178mg/100g), les graines oléagineuses (noix du Brésil : 367mg/100g ; amande : 232 mg/100g ; noix de Cajou : 223mg/100g ; cacahuètes : 193mg/100g ; noix : 144mg/100g), les féculents comme les céréales complètes et les légumes secs (son de blé : 546mg/100g ; quinoa cru : 204mg/100g ; haricots blancs secs : 187mg/100g ; flageolets secs : 160mg/100g ; farine de sarrasin : 157mg/100ml ; flocons d'avoine : 148mg/100g ; blé entier cru, riz complet cru : 100mg/100g), certains mollusques et crustacés (huîtres : 98mg/100g ; bulots : 89mg/100g ; sèches : 80mg/100g ; moules : 75mg/100g ; langoustines : 68mg/100g), les fruits secs (bananes : 108mg/100g ; figes : 53mg/100g ; dattes : 47mg/100g). Il ne faut

pas oublier que des eaux minérales comme Hépar[®], Quezac[®], Badoit[®] Contrex[®] en contiennent aussi (autour de 100 mg par litre) ainsi que les épices et les herbes aromatiques [ANSES, 2016a].

L'assimilation intestinale du magnésium, sous forme soluble ionisée, n'est pas optimale et est dépendante de divers facteurs. Ainsi pour 300 mg de magnésium ingérée, 100 mg sont absorbés. Cette capacité d'assimilation est inversement proportionnelle à la quantité prise : plus le magnésium est consommé lors d'un repas, moins l'organisme va pouvoir en absorber. Cela s'explique car les deux voies permettant son passage systémique présentent des limites : la diffusion passive paracellulaire n'a pas un fort débit et son transport actif transcellulaire est saturable. La première chose à faire est de répartir les apports en incluant les aliments riches en magnésium lors de plusieurs repas. Ensuite, il faut savoir que certains composés peuvent influencer cette assimilation et son passage au niveau cellulaire. Un apport concomitant de calcium, d'alcool, un excès de lipides diminuent son absorption. Au contraire, la vitamine B6, la vitamine D, la taurine potentialisent son passage et ses effets [BERTHELOT, ARNAUD, REBA, *et al.*, 2004] [SHWOB, 2015].

Une supplémentation en magnésium via des compléments alimentaires est possible chez le sportif, sauf en cas d'insuffisance rénale. C'est notamment le cas si certains signes d'une carence sont visibles, qu'ils coïncident avec une mauvaise alimentation ou si des troubles accentuent les pertes de ce minéral (diarrhées, vomissements, maladies digestives inflammatoires ou certains médicaments comme les diurétiques de l'anse ou thiazidiques, les pilules contraceptives). La limite de sécurité est fixée en France à 700 mg, la marge avant de l'atteindre est donc conséquente. Toutes les formes disponibles ne se valent pas. Tout d'abord, il faut observer le sel de magnésium présent car en fonction du composé avec lequel il est associé, la biodisponibilité et la teneur ou charge minérale en magnésium ne sont pas les mêmes. Il est aussi nécessaire de tenir compte de sa tolérance digestive (privilégier ceux dénués d'effets laxatifs) et du coût du supplément. Une des règles est qu'un sel difficilement assimilable, insoluble par exemple, a potentiellement un effet laxatif plus important. Plusieurs générations de produits se sont succédées : des sels inorganiques insolubles (oxyde, hydroxyde) et solubles (sulfate, chlorure) aux sels organiques solubles (lactate, citrate, malate, aspartate, pidolate) jusqu'aux sels liposolubles (glycérophosphate) et aminocomplexés (bisglycinate). Les sels comme le citrate, le malate, le glycérophosphate ou le bisglycinate de magnésium sont facilement assimilables, ils ont une charge minérale correcte et ne présentent pas de défauts particuliers. L'association avec de la vitamine B6 et de la taurine ainsi qu'une répartition homogène des prises au cours de la journée sont à conseiller [AFSSA, 2009] [LA NUTRITION.FR, 2015].

b. La vitamine D : insuffisance du statut vitaminique

La prévalence du déficit de cette vitamine est particulièrement importante en France. Des recueils de données récents attestent de la déficience du statut en vitamine D dans la population française. Plus de 75% de la population présentent des valeurs en 25-hydroxyvitamine D (calcifédiol) en deçà du seuil plasmatique minimal fixé à 30 ng/ml (75 nmol/l). Un taux sérique compris entre 20 et 30 ng/ml indique une insuffisance légère, une valeur se situant entre 10 et 20 ng/ml correspond à une carence modérée (40% de la population), en dessous de 10 ng/ml, on se trouve dans une situation de déficit et de carence sévères (moins de 5% des individus). La carence sévère est à l'origine d'un défaut de minéralisation osseuse, d'une hypocalcémie marquée : le rachitisme chez l'enfant et l'ostéomalacie chez l'adulte. Une insuffisance plus modérée est en cause dans des problèmes d'ostéoporoses par exemple [HAS, 2013] [LANDRIER, 2014] [SALLE, 2012] [VERNAY, SPONGA, SALANAVE *et al.*, 2012].

Pour couvrir nos besoins, l'ANSES a établi l'ANC de la vitamine D pour les adultes à 200 UI/j (5 µg/j). Deux réévaluations augmentent les recommandations. Les sportifs doivent hausser leur apport de 160 UI (4 µg/j) par jour et par tranche de 1000 kcal dépensées au-dessus du seuil énergétique moyen. En période hivernale, de novembre à mars, l'ANC est porté à 400 UI/j (10 µg/j). D'autres pays ont des recommandations plus importantes, l'Allemagne et les Etats-Unis d'Amérique ont fixé le seuil entre 600 et 800 UI/j (15-20 µg/j). L'Académie Nationale de Médecine, dans un rapport de 2012, évalue également à 800 UI/j l'apport journalier optimal pour les adultes entre 19 et 50 ans (au-delà de 50 ans la valeur monte à plus de 1000 UI/j) [AFSSA, 2009] [LANDRIER, 2014] [SALLE, 2012].

La vitamine D est une vitamine liposoluble qui présente la particularité de posséder une double origine. L'essentiel de la vitamine D provient d'une voie endogène. Elle est obtenue par un phénomène de néosynthèse se déroulant dans l'épiderme suite à une exposition solaire et plus particulièrement aux rayonnements ultra-violetts (UV) B. L'énergie apportée permet la synthèse de vitamine D3 au niveau du derme et de l'épiderme à partir d'un composé qui dérive du métabolisme du cholestérol à savoir le 7-déhydrocholestérol. La seconde source de vitamine D, minoritaire, est l'alimentation. Cette voie exogène apporte deux formes de vitamines D ayant une efficacité dans l'organisme différente. Les végétaux comme les champignons (girolles, morilles, cèpes, shiitakés) contiennent de la vitamine D2 ou ergocalciférol. La vitamine D3 ou cholécalciférol, plus efficace, est présente dans certains produits d'origine animale. Les sources les plus riches sont l'huile de foie de morue (250µg/100g), les œufs de cabillaud (27µg/100g), les poissons gras comme l'anguille (27µg/100g), le hareng (22µg/100g), le flétan (21µg/100g), la truite (19µg/100g), l'espadon (17µg/100g), la sardine (13µg/100g), le saumon et le hareng mariné (13µg/100g), le maquereau (12µg/100g), le thon (5µg/100g). Les jaunes d'œufs (2µg/100g) ou certaines

margarines végétales (7,5µg/100g) en contiennent aussi (1µg = 40 UI) [ANSES, 2016a] [HAS, 2013] [LANDRIER, 2014].

Un des problèmes est que l'apport essentiel de vitamine D provient d'un facteur qui est soumis à une multitude de variables : notre exposition solaire. La sédentarité, nos modes de vie (travail en intérieur) et notre situation géographique ne la favorisent pas forcément. L'activité sportive est normalement un élément positif car la plupart du temps elle se déroule à l'extérieur. Les athlètes présentent d'ailleurs un meilleur statut vitaminique que le reste de la population. Malheureusement, la FA se pratique essentiellement en intérieur. L'ensoleillement est un élément déterminant. Il dépend de la situation géographique, de la saison, des horaires. Même si les régions au nord ne bénéficient pas d'une durée d'ensoleillement aussi importante, cela ne pose pas de réels problèmes les mois d'été. En France et dans les pays situés aux mêmes latitudes (au-dessus du 35^{ème} parallèle nord), c'est en hiver que la situation se complique. La vitamine D ne se stocke pas sur de longues périodes, une concentration optimale en été ne signifie pas une absence de carence en hiver. D'octobre à mars, l'ensoleillement baisse, les jours raccourcissent et la capacité de synthèse diminue drastiquement (elle est quasi nulle entre novembre et février). Toutefois, lors des jours de beau temps, la voie de synthèse endogène s'active mais ce n'est pas obligatoirement le cas. Le rayonnement UV B, à nos latitudes, n'est plus aussi efficace. Les rayons parcourant davantage de chemin dans l'atmosphère, ils perdent énormément d'intensité avant de nous atteindre. En plus de cela, la surface cutanée exposée est nettement moins importante qu'en été. Certains caractères anthropomorphiques comme l'âge, le surpoids, la pigmentation de la peau, certaines pathologies (maladie de Crohn, problèmes hépatiques) représentent aussi des freins à la synthèse de la vitamine D. L'apport exogène apparaît alors comme une des solutions pour dissiper tout risque de carences en hiver [HAS, 2013] [LANDRIER, 2014] [NAIR ET MASEEH, 2012] [VERNAY, SPONGA, SALANAVE *et al.*, 2012].

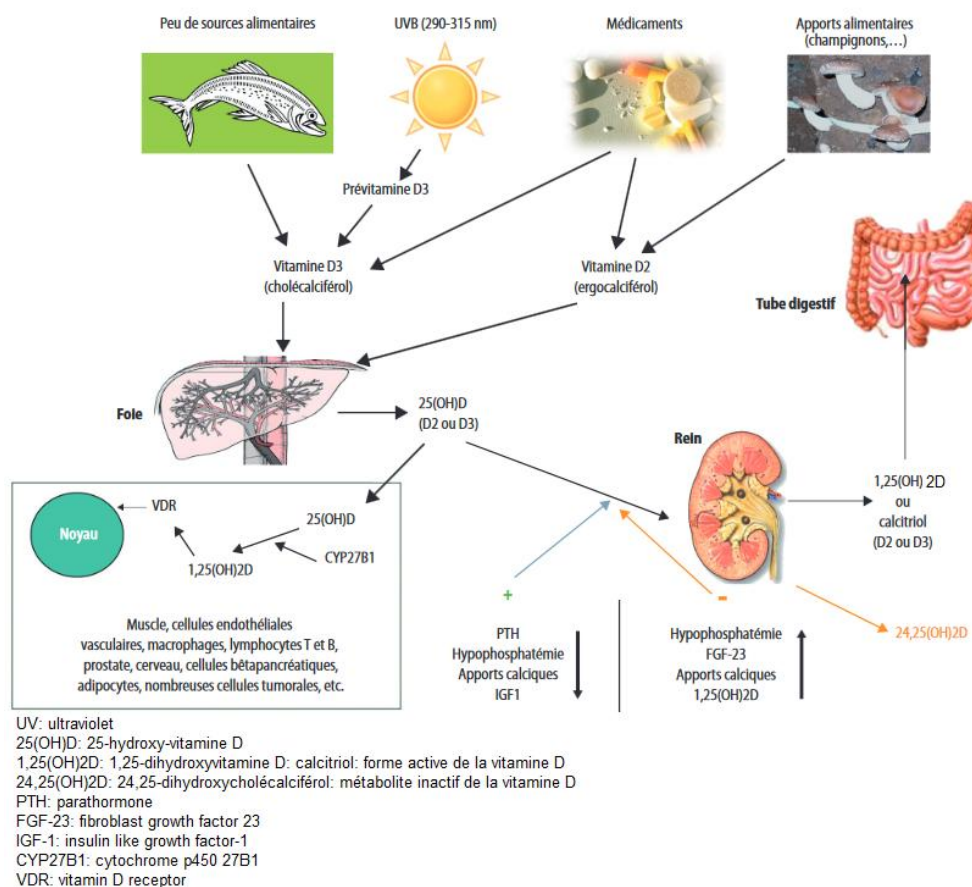


Figure 12. Métabolisme de la vitamine D [SOUBERBIELLE, 2011]

Le métabolisme de ce composé est complexe (Figure 12). La vitamine D, par l'action de son métabolite actif le calcitriol, possède des effets génomiques mais aussi non génomiques. Son action génomique est indissociable de sa fixation à son récepteur nucléaire : le VDR (*vitamin D receptor*). Il se trouve que ce dernier a une répartition ubiquitaire, il est disséminé dans tous les tissus et est présent dans un large panel de cellules. Ce qui signifie que la vitamine D exerce des actions à de nombreux niveaux et régule beaucoup de fonctions. Après sa fixation sur le VDR, ce dernier s'active et se couple avec un autre récepteur nucléaire le *retinoid X receptor* (RXR) pour former un hétérodimère (facteur de transcription). Ce complexe se lie ensuite sur une séquence régulatrice ou promotrice des gènes qui se trouve en amont de ces derniers (séquence nucléotidique spécifique ou éléments de réponse aux hormones). A ce niveau, ce facteur module la transcription des gènes par son action sur l'ARN polymérase et sur le complexe qu'il forme avec l'ADN. Le calcitriol régule l'expression génique d'un grand nombre de cellules : processus de différenciations, de proliférations cellulaires, d'apoptose, d'inflammations. De nombreuses études sont en cours afin d'établir l'utilité de la vitamine D : action sur l'immunité (diminution des infections virales respiratoires comme la grippe), sur la fonction cardiaque et

sur les problèmes d'hypertension (contrôle du gène codant pour la rénine ; inhibition du système rénine-angiotensine-aldostérone), protections contre certains cancers (sein et colorectal) et certaines pathologies auto-immunes ou métaboliques (sclérose en plaque, polyarthrite rhumatoïde, diabète de type II, maladie de Crohn, rectocolite hémorragique, obésité). La vitamine D régule aussi l'homéostasie du calcium, du phosphate. C'est une hormone hypercalcémiante et hyperphosphatémiante. Au niveau digestif, le calcitriol permet l'assimilation de ces minéraux par les entérocytes (il favorise aussi l'absorption du fer, du magnésium, du zinc). Au niveau rénal, il limite leurs excrétions dans les urines. Enfin au niveau de l'os, il possède une action directe sur les ostéoblastes et sur la production de facteurs locaux de régulations. Il est impliqué dans le remodelage de l'os en favorisant la résorption osseuse et en permettant ensuite une bonne minéralisation. La présence de calcitriol exerce aussi un rétrocontrôle négatif sur la parathormone. La vitamine D diminue le risque de fractures grâce à son effet sur le métabolisme calcique et renforce le système musculaire. Ce phénomène est intéressant à étudier surtout pour les athlètes de force. Néanmoins, à l'heure actuelle, rien ne permet d'affirmer que la vitamine D possède une action directe sur l'augmentation de la force et l'amélioration des résultats [HAS, 2013] [LANDRIER, 2014] [NAIR ET MASEEH, 2012] [SOUBERBIELLE, 2011].

Afin d'avoir un statut vitaminique optimal, il est nécessaire de suivre les recommandations éditées précédemment : s'exposer au soleil de manière raisonnable, régulière et aux heures les moins chaudes ; consommer des aliments sources de vitamines D notamment des poissons gras, des champignons, des œufs. En respectant ces mesures, le risque d'insuffisance est moindre surtout du printemps à l'automne. Le problème peut se poser en hiver car la vitamine D ne proviendra que d'un apport alimentaire correct. L'idéal est de réaliser un prélèvement sanguin afin de mesurer son taux sérique de calcifédiol. En fonction des résultats, le médecin peut adapter sa réponse. Dans le cas d'insuffisance ou tout simplement en prévention, il pourra prescrire des doses de vitamines D. Elles se présentent la plupart du temps sous forme d'ampoules contenant du cholécalférol comme l'Uvedose 100 000 UI[®], le Zyma D 80 000 UI[®] et 200 000 UI[®] et sont délivrées sur ordonnance. La posologie varie en fonction des objectifs du médecin. A côté de cette forme, il existe aussi des suppléments de cholécalférol sous forme de gouttes, disponibles sans ordonnance, comme le Zyma D 10 000 UI[®]. Quelques gouttes peuvent être prises de manière quotidienne (1 goutte représente 300 UI). La marge de sécurité concernant cette vitamine est importante, le seuil de toxicité se situe à plus de 100 ng/ml (voir même au-delà de 150 ng/ml à 250 ng/ml selon certains auteurs). L'Académie de médecine estime qu'un apport de 4000 UI/j de vitamine D est sans danger tandis que la HAS conclut qu'il est fortement improbable d'observer une toxicité en dessous de doses inférieures à 10 000 UI/j. L'hypervitaminose D est rare mais elle engendre de sérieuses complications comme une

calcification extra osseuse ainsi qu'une hypercalcémie conduisant à des insuffisances rénale et cardiaque, à un coma et éventuellement à la mort. Certaines pathologies peuvent en être la cause, des granulomatoses comme la sarcoïdose engendrent une dérégulation dans la production de calcitriol aboutissant à cette situation. Une intoxication accidentelle d'origine iatrogénique est aussi possible [HAS, 2006] [HAS, 2013] [LANDRIER, 2014] [SALLE, 2012] [SOUBERBIELLE, 2011].

c. Les anti-oxydants au service des athlètes de force athlétique

Les athlètes de FA se trouvent confrontés à un problème de stress oxydant important. Les anti-oxydants apportés par l'alimentation doivent venir renforcer les moyens dont dispose l'organisme afin de se défendre contre la multiplication des agressions radicalaires.

Les radicaux libres (RL) sont des composés chimiques présentant une instabilité du fait de la présence sur leur couche externe d'un ou de plusieurs électrons non appariés. De manière générale, ils ont une courte demi-vie et une réactivité plus ou moins importante avec les éléments environnants plus stables : protéines, AG, ADN. Cela signifie qu'ils peuvent s'y attaquer en leur prenant un électron (réaction d'oxydoréduction), certains radicaux arrivent aussi à arracher des atomes d'hydrogène ou s'ajouter dans des doubles liaisons. Ces composés peuvent être de natures différentes : soufrés, azotés, oxygénés. Les dérivés réactifs de l'oxygène (ROS : *reactive oxygen species*) regroupent certains des composés les plus réactifs. Le radical superoxyde, le radical hydroxyle (courte demi-vie ; forte réactivité ; potentiel d'oxydoréduction important), le radical peroxyde ou perhydroxyle sont des RL. D'autres ROS, comme le peroxyde d'hydrogène (eau oxygénée), l'oxygène singulet, bien que réactifs et potentiellement précurseurs de RL ne sont pas radicalaires (ils ne possèdent pas d'électron non apparié) [DELATTRE, BEAUDEUX ET BONNEFONT-ROUSSELOT, 2007] [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE, *et al.*, 2007].

Les RL sont en partie responsables de leur propre production à travers des réactions d'oxydoréduction. Une des réactions les plus marquantes est sans doute la réaction de Fenton qui aboutit à la production du radical hydroxyle (lors d'une surcharge en fer). Certains ROS sont des sous-produits de réactions endogènes, inhérent au fonctionnement de l'organisme et à son utilisation de l'oxygène (mitochondrie, peroxysome). Le processus énergétique aérobie de la cellule en est l'exemple le plus marquant. Le problème est que le mécanisme de formation d'ATP n'est pas parfait, un faible pourcentage de composés intermédiaires de nature radicalaire s'échappe avant d'avoir atteint le stade final. Diverses classes enzymatiques ont aussi un rôle dans leur formation. Le complexe enzymatique NADPH (forme réduite du NADP : nicotinamide adénine dinucléotide phosphate) oxydase présent dans les cellules comme les macrophages ou les polynucléaires neutrophiles sont à

l'origine de la formation de RL (phénomène d'explosion respiratoire ou *oxydative burst*). Cette production tient un rôle primordial dans l'immunité car elle représente un des moyens que possèdent nos cellules immunes afin de détruire des agents pathogènes. L'apparition de RL peut aussi provenir de réactions d'auto-oxydations de neuromédiateurs, de coenzymes réduits, dans le métabolisme des xénobiotiques et des réactions de détoxification par les cytochromes p450. La xanthine oxydase en produit lors du métabolisme des bases puriques. L'organisme libère des RL lors de la fabrication de médiateurs dans les phénomènes d'inflammation et d'allergie. Le métabolisme de l'acide arachidonique (peroxydation lipidique radicalaire) est en un exemple [DELATTRE, BEAUDEUX ET BONNEFONT-ROUSSELOT, 2007] [GARDES-ALBERT, BONNEFONT-ROUSSELOT, ABEDINZADEH *et al.*, 2003].

Une voie exogène multifactorielle peut être une source de production de RL par un mécanisme de clivage homolytique ou par une exacerbation des voies endogènes de production. Certaines conditions comme la chaleur et les rayonnements provoquent la rupture de la liaison covalente de deux atomes d'une même entité où chaque fragment ne garde plus qu'un des deux électrons du doublet (naissance de deux RL). Notre mode de vie et l'environnement dans lequel nous évoluons sont responsables de ce fait. L'exposition prolongée au rayonnement solaire ou ionisant (UV, X, γ), à des polluants (pesticides, peintures, pollutions, amiante), à des métaux lourds, le tabagisme, de mauvaises habitudes alimentaires (alcool, additifs alimentaires, graisses rances, cuisson et formation de produits de dégradations toxiques), l'obésité, l'hypertension, la prise de pilule contraceptive, le stress psychologique et physique avec l'activité sportive intense sont quelques exemples de situations qui provoquent un stress oxydant [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE *et al.*, 2007].

Les RL dénaturent les AGPI, les phospholipides présents dans les membranes cellulaires par des réactions de peroxydations lipidiques. De la même façon, ils altèrent les lipoprotéines circulantes. Ces structures vont être désorganisées, perdre en fluidité et possiblement se rompre amenant à la mort de la cellule. Ils attaquent aussi certains AA constituant les protéines altérant de fait leur fonction. Les RL réagissent avec l'ADN (surtout avec la guanine) et la détériorent. Ils engendrent une altération dans la transcription du message génétique avec apparition de mutations (hyperprolifération, mort cellulaire). Concrètement ces agressions radicalaires incontrôlées entraînent à plus ou moins long terme bon nombre de problèmes. Un des plus connus est le vieillissement accéléré de la peau. Ils accélèrent et engendrent diverses atteintes tissulaires comme des fibroses bronchiques, une dysfonction endothéliale entraînant la formation de plaques d'athérome, le durcissement des artères, la détérioration des articulations, des muscles. Ils potentialisent ainsi des maladies neurodégénératives (Alzheimer), rhumatismales (arthrose, arthrite), cancéreuses, cardio-vasculaires, bronchiques, métaboliques (diabète) [DELATTRE,

BEAUDEUX ET BONNEFONT-ROUSSELOT, 2007] [GARDES-ALBERT, BONNEFONT-ROUSSELOT, ABEDINZADEH *et al.*, 2003] [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE *et al.*, 2007].

La FA provoque une exacerbation de la production de ces composés. L'origine de cette surproduction est multiple. La mitochondrie laisse échapper de plus grandes quantités de ROS car son activité de production d'énergie augmente (phénomène nettement moins marqué dans les sports de force que d'endurance). Le processus dit d'ischémie-reperfusion se déroulant au sein des muscles lors de l'exercice anaérobie entraîne une surproduction de ROS par activation de la xanthine oxydase. L'acidose, les lésions cellulaires ainsi que les inflammations apparaissant pendant et à la suite de l'effort sont à l'origine de ce problème. Les foyers inflammatoires induisent une libération de prostaglandines (médiateurs) à partir de l'acide arachidonique et un recrutement de macrophages et de polynucléaires neutrophiles (libèrent des ROS). Cette succession d'étapes dans la prise en charge de l'inflammation provoque la libération dans le milieu de RL. Les lésions induites amplifient le problème. Des protéines comme des hèmes protéiques sont libérées et réagissent avec les ROS ce qui conduit à la présence de fer dans le milieu. Le peroxyde d'hydrogène déjà présent sur place réagit ainsi avec le fer (réaction de Fenton) pour donner des radicaux hydroxyles très réactifs [DELAVIER ET GUNDILL, 2012] [GROUSSARD, 2006].

Le stress oxydant désigne le déséquilibre qui existe entre d'un côté la production de RL et de l'autre les systèmes de défense de l'organisme. Plusieurs situations l'amènent : lorsque les agressions radicalaires sont de plus en plus importantes et qu'elles dépassent les systèmes de protection du corps ; lorsqu'il y a un dysfonctionnement des défenses sans pour autant être accompagné d'une production plus importante de radicaux. Il est nécessaire de différencier la production physiologique naturelle de ces composés avec des situations qui amènent leurs actions pathologiques. Lorsque l'organisme se trouve dans un état d'équilibre, les RL sont des composés utiles qui accompagnent bon nombre de réactions (énergétiques, détoxifiantes, signalisations cellulaires). Notre immunité bénéficie de leurs actions, ils interviennent aussi dans les phénomènes de signalisation amenant à l'apoptose de cellules tumorales. C'est lorsque l'équilibre est rompu que les effets délétères se manifestent, c'est cela le stress oxydant. Sans mécanisme de contrôle, les réactions et les attaques radicalaires se multiplient (réactions en chaîne) induisant inévitablement la dénaturation, la désorganisation et la dégradation des structures touchées. Les conséquences du stress oxydant sont multiples. Un athlète de FA présente une forte prévalence par rapport au stress oxydant. Les douleurs musculaires et articulaires persistantes peuvent en être les premiers signes. Les RL exacerbent et maintiennent des foyers inflammatoires, diminuent la récupération, permettent le développement des microlésions musculaires. Il est donc important de prévenir ce problème afin de conserver une bonne santé générale et maintenir

une courbe de progression [DEFRAIGNE ET PINCEMAIL, 2008] [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE, *et al.*, 2007].

Les défenses de l'organisme et l'importance des anti-oxydants : tour d'horizon

Les mécanismes de protection ont une double origine. Ils peuvent être endogènes, c'est-à-dire présents naturellement dans l'organisme et exogènes par l'apport de composés anti-oxydants alimentaires. Les anti-oxydants diffèrent aussi par leurs natures (enzymes, vitamines, composés phénoliques), leurs cibles préférentielles, leurs modes et leurs lieux d'action. Les composés présentés ci-dessous ont une synergie d'action, ne concentrer ces apports que sur une molécule en particulier ne donnera pas de résultats probants [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE, *et al.*, 2007].

Les enzymes anti-oxydantes et l'importance des oligo-éléments

Le premier mécanisme défensif est un système endogène composé d'enzymes couplées à des minéraux et des oligo-éléments. Ce système est présent naturellement et sert à maintenir les RL à un niveau basal. La superoxyde dismutase (SOD) est une métalloprotéine qui catalyse la réaction de dismutation du radical superoxyde en peroxyde d'hydrogène et en oxygène. Pour agir, elle a besoin de cofacteurs métalliques comme du cuivre et du zinc au niveau de sa forme cytosolique et de manganèse dans sa forme mitochondriale. La glutathion peroxydase (GPx) est une sélénoprotéine contenant du sélénium. Cette enzyme réduit le peroxyde d'hydrogène en eau et neutralise les peroxydes lipidiques par l'utilisation de son substrat, le glutathion réduit, comme donneur d'hydrogène. La catalase permet la dismutation du peroxyde d'hydrogène en eau et en dioxygène. Cette enzyme se rencontre surtout au niveau intracellulaire notamment dans les peroxysomes. Les thiorédoxines réductases sont des enzymes anti-oxydantes qui dégradent les peroxydes lipidiques, le peroxyde d'hydrogène et qui permettent la régénération du radical ascorbyl en acide ascorbique. Ce sont aussi des sélénoprotéines dépendantes du sélénium. L'hème oxygénase catalyse la réaction de dégradation de l'hème en biliverdine puis en bilirubine (qui possède des propriétés anti-oxydantes) [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE *et al.*, 2007].

L'efficacité du système de défense enzymatique passe donc par un apport adéquat en oligo-éléments : zinc, cuivre, sélénium et manganèse. Les recommandations sont à la hausse pour ces 4 éléments. Le zinc présente aussi une importance particulière pour le sportif de force de par son rôle dans le métabolisme protéique, parce qu'il permet une bonne cicatrisation tissulaire et un renouvellement cellulaire correct. Attention toutefois de ne pas apporter du zinc et du cuivre en trop grandes quantités car ils sont alors pro-oxydants.

Concernant le zinc (ANC homme/femme : 12/10 mg par jour ; + 1mg/1000kcal ; limite d'apport fixé à 15 mg par jour) quelques aliments sont intéressants à consommer : l'huître

(de 20 à 45mg/100g), le crabe (12mg/100g), les viandes de bœuf (de 4 à 9mg/100g), de veau (de 4 à 7,5mg/100g), d'agneau (5mg/100g), les volailles (2,5mg/100g pour le poulet). Les produits laitiers, les céréales, certaines graines oléagineuses et légumineuses complètent l'apport. Le sélénium (ANC 60/50 µg par jour ; +30µg/1000kcal ; limite d'apport fixé à 150 µg par jour) provient essentiellement des poissons et des coquillages : thon au naturel (250µg/100g), espadon (120µg/100g), julienne (60µg/100g), moules (57µg/100g), maquereau et dorade (50µg/100g). La noix du Brésil ainsi que les abats en contiennent plus de 100µg/100g, le jaune d'œuf et la viande en apportent aussi. Le cuivre (ANC 2/1,5 mg par jour ; + 0,6mg/1000kcal ; limite d'apport fixé à 3,5 mg par jour) est très présent dans le foie. Les oléagineux, les légumes secs, la spiruline sont aussi de bonnes sources. Le manganèse (ANC 1/2,5 mg par jour ; + 0,6mg/1000kcal ; limite d'apport fixé à 3,5 mg par jour) provient des céréales complètes, des oléagineux, des légumes secs [ANSES, 2016a].

Les composés anti-oxydants non enzymatiques

Le second mécanisme comprend les composés endogènes (par biosynthèse) et exogènes (par l'alimentation) qui diminuent les processus d'oxydation par leurs propriétés d'agents réducteurs. Un bon anti-oxydant doit neutraliser les RL mais il doit aussi pouvoir se faire recycler afin d'être réutilisé plusieurs fois. Sa forme oxydée doit être la moins réactive.

Les anti-oxydants endogènes

Le glutathion est un tripeptide hydrosoluble endogène (glycine, glutamate, cystéine) cofacteur de la GPx. Il est très présent au niveau cellulaire (surtout dans le foie et les reins) où il se retrouve essentiellement sous sa forme réduite active le gamma-glutamyl-cysteinyl-glycine (GSH), sa forme oxydée étant le di-sulfure de glutathion (GSSG). Il est impliqué dans des réactions d'oxydoréduction et participe ainsi à l'élimination de RL. C'est un composé extrêmement important dans le mécanisme anti-oxydant intracellulaire notamment par sa complémentarité avec les vitamines anti-oxydantes. Il chélate aussi différents métaux lourds (mercure, plomb) et permet la régénération des formes réduites des vitamines E et C. Le problème est que le radical oxydé GSSG est de nature pro-oxydant, son accumulation au sein de la cellule n'est pas souhaité. Le rapport GSH/GSSG doit rester assez élevé. L'organisme en synthétise la majeure partie, peu d'aliments en contiennent et la supplémentation orale en GSH n'est que peu efficace. L'idéal pour le sportif est de consommer des aliments protéinés riches en précurseurs comme la cystéine. Au vu du régime de ce type de sportif, cela ne pose en l'occurrence pas de problème. L'apport de vitamines anti-oxydantes est aussi souhaité afin de régénérer cette forme réduite.

Le coenzyme Q₁₀ (ubiquinone) est une molécule ubiquitaire du groupe des benzoquinones liposolubles. Elle possède un rôle important par sa puissante capacité anti-

oxydante. C'est sa forme réduite, l'ubiquinol, qui lui confère cette propriété. Sa structure lui permet de s'imbriquer dans les membranes et les lipoprotéines. C'est un transporteur d'électrons, ce qui lui confère un rôle essentiel au sein de la chaîne respiratoire mitochondriale et donc dans le métabolisme énergétique aérobie des cellules. A ce niveau, l'ubiquinol, empêche la peroxydation lipidique dans les membranes en coopérant avec la vitamine E (il régénère aussi sa forme oxydée). Ce composé est synthétisé par l'organisme suivant la même voie que celle du cholestérol donc à partir de l'acétyl Co A (les traitements par statines inhibent donc sa formation). Cette biosynthèse endogène représente 20% du total. Les 80% restants proviennent de l'alimentation. Aucune recommandation ne fixe les apports conseillés pour le coenzyme Q₁₀ mais il semble qu'un apport alimentaire de 30 mg/j soit un minimum afin de faire augmenter le taux plasmatique, avec une réévaluation en hausse pour le sportif (innocuité du Q₁₀ même en fortes doses). Une alimentation riche en coenzyme Q₁₀ peut avoir des effets bénéfiques aux niveaux musculaire, cardiaque, neurologique. Les aliments comme les poissons gras tels la sardine, le hareng, la truite en contiennent quelques mg aux 100 g (les lipides favorisent son assimilation). La viande de bœuf, les graines oléagineuses, les huiles de soja et de colza sont aussi des choix possibles. Enfin certains fruits et légumes comme les oranges et brocolis complètent la liste. L'acide α -lipoïque, l'acide urique, la bilirubine, la transferrine possèdent aussi des capacités anti-oxydantes [MALCHAIR, VAN OVERMEIRE, BOLAND *et al.*, 2005] [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE *et al.* 2007].

Les anti-oxydants exogènes

La vitamine E est une vitamine liposoluble qui comprend huit molécules réparties dans deux familles : les tocophérols et les tocotriénols. L' α -tocophérol est la forme principale, elle présente un fort pouvoir anti-oxydant. Sa chaîne latérale aliphatique est hydrophobe ce qui lui permet de s'insérer dans les membranes lipidiques. Cet isomère est très présent dans les mitochondries, dans les lipoprotéines comme les LDL. A ce niveau, cet isomère de vitamine E empêche la propagation des radicaux peroxydes lipidiques survenant lors de la peroxydation lipidique. L' α -tocophérol est essentiel pour protéger les membranes lipidiques des agressions radicalaires. Sa forme oxydée, l' α -tocophéryl, est peu réactive. Le glutathion, la vitamine C, le coenzyme Q₁₀ permettent de régénérer sa forme réduite. Cette vitamine doit être obligatoirement apportée par l'alimentation. La vitamine E a un ANC fixé à 12 mg/j avec une réévaluation de 12 mg par tranche de 1000 kcal dépensées. La valeur limite conseillée est à 50mg/j. Les huiles végétales comme l'huile de germe de blé (149mg/100g), l'huile de tournesol (58mg/100g), l'huile de colza (28mg/100g), l'huile d'olive (22mg/100g) en contiennent de bonnes quantités. Les oléagineux avec les amandes (24mg/100g) et les noisettes (15mg/100g) sont aussi une source précieuse de vitamine E [ANSES, 2016a]

[GARDES-ALBERT, BONNEFONT-ROUSSELOT, ABEDINZADEH *et al.*, 2003] [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE *et al.*, 2007].

La vitamine C ou acide L-ascorbique est une vitamine hydrophile piègeuse de RL. A pH physiologique, la vitamine C se trouve sous forme d'ascorbate. Elle agit en tant qu'agent réducteur et piège les radicaux hydroxyles et superoxydes. Cette vitamine permet aussi la régénération du glutathion et celle de l' α -tocophérol. Elle possède une synergie d'action avec ce dernier dans la lutte contre la peroxydation lipidique. Le radical ascorbyle obtenu est peu réactif vis-à-vis de son environnement et peut être régénéré par le glutathion réduit. Les autres vertus de la vitamine C sont nombreuses : immunité, capacité anti-inflammatoire, permet l'assimilation du fer, rôle dans le métabolisme du collagène. L'ANC est de 110mg/j avec une réévaluation de 100 mg par tranche de 1000 kcal dépensées, la limite conseillée est fixée à 600 mg (attention aux fumeurs qui présentent des besoins plus élevés). Ce sont les fruits et les légumes qui fournissent le plus de vitamine C. Elle se trouve notamment dans les agrumes (pamplemousse 61mg/100g ; orange 57mg/100g ; citron 51mg/100g), la goyave (228mg/100g), le kiwi (93mg/100g), les fruits rouges (cassis 181mg/100g ; fraise 67mg/100g, les poivrons (crus 121mg/100g ; cuits 75mg/100g), les brocolis (crus 106mg/100g ; cuits 40mg/100g), les choux de Bruxelles cuits (crus 103mg/100g ; cuits 56mg/100g), le cresson (52mg/100g). La cuisson impacte fortement la teneur en vitamine C de l'aliment à cause de la thermosensibilité de ce composé. Les valeurs citées au-dessus en tiennent compte, ainsi un brocoli cru, un chou de Bruxelles crus contiennent presque trois fois plus de vitamine C dans cet état. Afin de préserver les qualités nutritives des aliments, il convient de les consommer crus, quand cela est possible, ou de privilégier un mode de cuisson adapté (la vapeur) [ANSES, 2016a] [GARDES-ALBERT, BONNEFONT-ROUSSELOT, ABEDINZADEH *et al.*, 2003] [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE *et al.*, 2007].

La famille des caroténoïdes comprend des composés se présentant sous forme de pigments et qui sont présents dans de nombreux organismes. Cette famille se divise en deux groupes. D'un côté, il y a les carotènes dont le β -carotène (ou provitamine A) et le lycopène. De l'autre, il y a les xanthophylles avec le lycopène, la lutéine, la zéaxanthine, l'astaxanthine notamment. Les caroténoïdes agissent en piégeant les RL et notamment l'oxygène singulet. Cela fait d'eux de bons photoprotecteurs, ils diminuent les effets nocifs du rayonnement UV aux niveaux cutané ou oculaire. La lutéine et la zéaxanthine tiennent ce rôle au niveau de la rétine (protection contre la dégénérescence maculaire liée à l'âge et la cataracte). Ces pigments sont retrouvés essentiellement dans les fruits et les légumes colorés (certains produits de la mer en contiennent aussi). Concernant le β -carotène, l'ANC est de 2400/1800 μ g/j (homme/femme) avec une réévaluation de 1000 μ g toutes les 1000 kcal dépensées (limite d'apport conseillé à 8400 μ g/j). Les algues comme le nori, le wakamé, le fucus sont très riches en β -carotène. Des aliments comme les patates douces (10500 μ g/100g), les

carottes (crues 8290µg/100g ; cuites 3340µg/100g), les épinards (1610µg/100g), les potirons (6940µg/100g) ou les salades ne sont pas en reste. La lutéine et la zéaxanthine (pigment rouge-orangé) se retrouvent dans les jaunes d'œufs, le maïs, les carottes, les choux, les brocolis, les courges. L'astaxanthine est produit dans certaines algues et planctons, et se retrouve dans le krill, la crevette, le saumon. Le lycopène (pigment rouge) se trouve dans la tomate, la pastèque, le pamplemousse. Contrairement à la vitamine C, le lycopène voit sa biodisponibilité augmentée avec la chaleur (intérêt des préparations du type sauce tomate cuite) [ANSES, 2016a] [GARDES-ALBERT, BONNEFONT-ROUSSELOT, ABEDINZADEH et al 2003] [HALENG, PINCEMAIL, DEFRAIGNE *et al.* 2007].

Les anti-oxydants exogènes polyphénoliques naturels regroupent un grand nombre de composés répartis dans différentes familles (flavonoïdes, tanins, anthocyanes, coumarines par exemple). Ils possèdent une importance essentielle dans les mécanismes de défenses anti-oxydantes en piégeant les ROS, en inhibant les enzymes productrices de ces composés, en chélatant les métaux lourds et en régissant la libération de monoxyde d'azote (effet vasodilatateur). Les polyphénols sont spécifiques du règne végétal. Il serait long d'énumérer tous les aliments bénéfiques à ce niveau. Les feuilles de thé, le café, les fruits rouges, les baies, le raisin, les brassicacées ou crucifères (brocolis, choux, cresson) sont des exemples parmi d'autres. La forte présence de ces composés dans les fruits et légumes justifie une fois de plus l'importance d'en consommer. L'utilisation d'épices et d'herbes aromatiques en accompagnement renforce la protection anti-oxydative [DEFRAIGNE ET PINCEMAIL, 2008].

D. Objectifs du sportif et réalisation d'un plan alimentaire

Le point essentiel est de comprendre que la démarche doit être individualisée et qu'elle doit reposer sur les objectifs personnels du sportif, sur les différentes recommandations d'apports qui en découlent et les stratégies nutritionnelles en termes de *timing* de prises. L'objectif est de savoir quoi manger, en quelles quantités et à quel moment il est préférable d'avoir cet apport.

1. La couverture énergétique et l'optimisation de la composition corporelle

Le point le plus important est que le plan alimentaire doit suivre les objectifs « poids » de l'athlète. La balance énergétique est utile car elle permet de fixer trois grandes bases : lorsque les apports équivalent aux dépenses, le poids se maintient ; lorsque les apports sont supérieurs aux dépenses, le poids augmente ; lorsque les apports sont inférieurs aux dépenses, le déficit calorique engendre une perte de poids [BLANC, 2000] [PERES, 2016].

Un même individu peut alterner des phases de prises de poids, de maintien ou de pertes, c'est pourquoi il est nécessaire d'appréhender au mieux ce mécanisme de balance énergétique. A chaque situation, j'illustrerai mes propos avec une démonstration en prenant mon cas personnel comme exemple : DEJ à 2700 kcal.

a. Maintien de sa condition physique

Si l'objectif du sportif est une prise de force nerveuse sans prise de poids ou simplement un maintien de sa condition physique, les apports doivent être au même niveau que les dépenses. Les macronutriments se répartissent de cette manière : entre 1,5 et 2 g/kg/j de protéines ; de 1 à 2 g/kg/j de lipides ; de 4 à 7g/kg/j de glucides. Personnellement, en phase de maintien, je dois apporter 2700 kcal. J'ai plusieurs possibilités concernant la répartition des macronutriments. Après différents essais, je trouve que ma progression et ma condition physique sont satisfaisantes avec un apport approximatif de 1,8 g/kg/j de protéines (126 g, 500 kcal) et de 1,3 g/kg/j de lipides (91 g, 820 kcal). Les glucides combleront les calories manquantes soit 1380 kcal (345 g) soit 4,9 g/kg/j. Les protéines couvrent 18,5% de mon AETQ, les lipides 30,4% et les glucides 51,1%.

b. Gain de poids

Lors d'une phase de progression liée à une hypertrophie musculaire ou pour monter de catégorie de poids, il est nécessaire d'être en surplus énergétique. Mais être dans cette phase ne signifie pas pour autant manger de tout dans des quantités inconsidérées. Le surplus calorique via des aliments de qualités doit rester contrôlé et progressif. Au départ, plusieurs centaines de calories en plus de sa DEJ sont suffisantes. Pour un novice, il est possible d'ajouter 300 kcal, sinon un intermédiaire de 100 à 200 kcal (l'athlète avancé présente théoriquement un poids et une musculature stables). Si les résultats ne sont pas significatifs alors une réévaluation doit être faite. Il ne faut pas aller au-delà tout simplement pour des questions de bon sens. Une prise de masse musculaire est automatiquement accompagnée d'une prise de masse grasse. Un apport trop important de calories va engendrer le stockage des macronutriments sous forme de TG. L'objectif n'est pas que le sportif devienne obèse et détériore sa santé (sur le plan cardio-vasculaire notamment), c'est pour cela qu'il est nécessaire d'y aller progressivement et sur des périodes précises. Etant novice, je peux donc élever mon apport à 3000 kcal par jour. Les glucides représentent le facteur à modifier en premier lieu, je rajoute donc à ma ration quotidienne 300 kcal de ce macronutriment sous forme de féculents et de fruits. Au fur et à mesure de l'évolution de mon poids, j'adapterai mes apports en protéines et en lipides [HELMS, VALDES ET MORGAN, 2015] [VENESSION, 2011].

c. Perte de poids

Dans une situation qui contraint l'athlète à perdre du poids, les apports devront être réduits en deçà de ses dépenses. Quelques situations peuvent l'exiger : une démarche volontaire pour atteindre une catégorie de poids inférieure, perdre de la masse adipeuse en cas de surpoids, rectifier son poids lorsqu'il dépasse la limite supérieure de la catégorie dans laquelle le sportif s'est inscrit. Ici, l'objectif de perte de poids doit être réalisé sans entraîner une diminution trop importante des performances, ni une fatigue excessive ou une diminution de son immunité. C'est pourquoi, il ne faut pas baisser trop drastiquement le total calorique et ne pas supprimer totalement certaines catégories d'aliments. Une privation est le meilleur moyen pour entraîner une fonte musculaire, des carences, une chute du taux des hormones, des risques de blessures et de surentraînement. Si le délai le lui permet, quelques centaines de calories en moins par jour est un bon début. Pour un athlète sans surpoids, une perte de 500 g par semaine soit 2 kg par mois est correcte. Il n'y a là pas de règles universelles, le calcul de diminution calorique doit être entrepris en connaissance des objectifs, du délai pour y arriver et surtout être adapté en fonction de son ressenti et des résultats. Si j'étais dans cette situation, je réduirais dans un premier temps mon apport de 300 kcal, en privilégiant un retrait des glucides. J'observerais ensuite l'évolution de mon poids, de mes performances sportives et de mon état de santé général (fatigue, douleurs, maladies éventuelles). J'adapterais cette restriction calorique à ces paramètres jusqu'à atteindre mon objectif. Au niveau stratégique, il est évident que les collations et les repas entourant mon entraînement ne doivent pas subir cette diminution d'apport en glucides [THOMAS, GONZALEZ, PEREIRA *et al.*, 2014] [VENESSION, 2011].

2. Répartition des apports

Une fois déterminés l'apport calorique et les quantités de chaque macronutriment, il est nécessaire de traduire ces chiffres en aliments à consommer et d'organiser la répartition des prises en fonction du rythme alimentaire et des phases d'entraînement/ compétition. Le principe est de déterminer les meilleurs aliments à prendre aux bons moments et aux quantités les plus adaptées. Le nombre de repas et de collations varie en fonction des calories à apporter et de l'appétit du sportif. Il n'existe pas de règles universelles mais une base de trois repas pris à heures fixes (petit déjeuner, déjeuner et dîner) et un ajout variable de collations entre ces repas, autour de l'entraînement semble convenir. Le nombre de calories par repas peut varier (plus pour les principaux, moins pour les collations), mais il est nécessaire de ne pas sous-évaluer le petit déjeuner (il permet de rompre le jeun de la nuit et de relancer le métabolisme) et surtout le repas qui suit l'entraînement. Concernant la composition en macronutriments, une prise répétée de 25 g de protéines de qualité (au minimum) est recommandée. Les glucides peuvent être répartis dans la journée en

privilégiant une prise avant et surtout après l'entraînement. L'IG doit être bas ou modéré loin des phases d'effort, mais il doit augmenter lorsque l'athlète s'en rapproche (avec un IG élevé pendant). A l'inverse, il faut diminuer les quantités de lipides à ce moment-là car ils vont demander un travail digestif trop lourd énergétiquement et ils vont retarder l'assimilation des AA et des glucides. La collation pré-entraînement doit se composer de protéines et de glucides bien assimilés et digestes sans trop de fibres et de lipides. Pendant la séance, la boisson peut contenir des glucides à IG haut de type maltodextrine avec une limite conseillée à 60 g par litre [EFSA, 2015] [IFN, 1997a].

Il est nécessaire de traduire ces données théoriques en choix alimentaires. Pour ce faire, les connaissances acquises et l'utilisation des tables d'équivalences nutritionnelles CIQUAL le permettent [ANSES, 2016a]. Libre au sportif d'adapter les quantités et les aliments en fonction de ses goûts, de son budget, de ses objectifs. L'individualisation doit être au cœur de la démarche car ce qui fonctionne sur un athlète ne marchera pas obligatoirement pour un autre.

4. CONCLUSION

La FA est une discipline sportive très exigeante aussi bien mentalement que physiquement. Sa pratique régulière impose de fortes contraintes sur l'organisme des athlètes et est à l'origine de bouleversements métaboliques, physiologiques et nerveux. Un contexte sportif réunissant des entraînements de qualités et des phases de récupérations favorables, va irrémédiablement amener à des processus d'adaptation corporelle. C'est pour toutes ces raisons que l'alimentation doit être spécifique et de qualité. Ne pas en tenir compte peut entraver la marge de progression, limiter les performances et induire un risque de blessures, accélérer l'apparition de pathologies diverses. A travers ce travail, j'ai tenté de faire découvrir ce sport, l'impact de sa pratique et les besoins nutritionnels spécifiques qui en découlent. L'objectif pratique est d'aiguiller les athlètes afin qu'ils puissent gérer du mieux qu'ils le peuvent leur alimentation à travers des choix judicieux dans les apports, dans les timings de prises.

Appliquer et restituer une partie de ces informations au comptoir d'une officine peut sembler inadapté. Ce n'est pas tous les jours que j'ai l'occasion de rencontrer un pratiquant de FA. Mais bien au-delà de l'aspect sportif, l'élaboration de ce manuscrit m'a donné l'opportunité d'appréhender des notions et d'approfondir mes connaissances nutritionnelles, anatomiques et physiologiques. Ma pratique officinale s'en trouve grandement améliorée car en perfectionnant mes compétences dans ces domaines et surtout en nutrition, j'ai renforcé mon aptitude à dialoguer, à échanger et à conseiller mes patients. En sachant que l'alimentation est un sujet qui touche énormément d'individus, l'application concrète de ces connaissances se fait donc de manière quotidienne, l'objectif étant de rappeler les mesures hygiéno-diététiques spécifiques aux patients et d'essayer de leur faire adopter des bonnes habitudes alimentaires. Il est essentiel d'insister sur ces points car l'application qui en résulte peut avoir des effets positifs importants. Cela peut permettre d'optimiser le traitement médicamenteux, de réduire les effets secondaires, de contrôler et de traiter au mieux leurs pathologies, de prévenir et de diminuer l'incidence de certaines maladies. Ces connaissances me donnent aussi l'opportunité de proposer des suivis nutritionnels.

Je finirai ce travail de thèse en insistant sur l'importance de notre rôle dans le conseil et l'écoute. Si le pharmacien d'officine veut continuer à être crédible et légitime aux yeux du grand public, il se doit de promouvoir des actions de ce type. Ce n'est qu'à ce titre que nous demeurerons des acteurs majeurs de la santé en France.

BIBLIOGRAPHIE

AAGAARD P., ANDERSEN JL. A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training: changes in muscle architecture. *The Journal of physiology*, 2001, 534 (2) : pp. 613-623.

AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments). Apports nutritionnels conseillés pour les sportifs, synthèse des recommandations, 2000, disponible sur http://www.preparationphysique.net/download/recommandations_alimentaires.pdf (page consultée le 19/01/17).

AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments). Glucides et santé : Etat des lieux, évaluation et recommandations, 2004, disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Glucides.pdf> (page consultée le 06/01/17).

AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments). Apport en protéines: consommation, qualités, besoins et recommandations, 2007, disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-Ra-Proteines.pdf> (page consultée le 09/10/16).

AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments). Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'évaluation des teneurs en vitamines et minéraux des denrées enrichies et des compléments alimentaires : synthèse, saisine n° 2007-SA-0315, 2009, disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2007sa0315t2.pdf> (page consultée le 27/01/17).

AFSSA (Agence française de sécurité sanitaire des aliments), AFSSAPS (Agence française de sécurité sanitaire des produits de santé). L'essentiel du rapport « Sécurité et bénéfices des phyto-estrogènes recommandations », 2005, disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT-QR-phyoestrogenes.pdf> (page consultée le 19/12/16).

ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Consommation des poissons, mollusques et crustacés : aspects nutritionnels et sanitaires pour l'Homme, édition Scientifique, 2010, disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2006sa0035Ra.pdf> (page consultée le 28/11/16).

ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras, rapport d'expertise collective. 2011, disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2006sa0359Ra.pdf> (page consultée le 08/01/17).

ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Nutrition et cancer : légitimité de recommandations nutritionnelles dans le cadre de la prévention des cancers, édition scientifique, 2011, disponible sur <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2007sa0095Ra.pdf> (page consultée le 31/10/16).

ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Composition nutritionnelle des aliments TABLE CIQUAL 2016, disponible sur : <https://pro.anses.fr/tableciqual/> (page consultée le 17/10/16).

ANSES (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail). Les acides gras trans, 2016, disponible sur <https://www.anses.fr/fr/content/les-acides-gras-trans> (page consultée le 09/01/17).

ARDISON S. *Strength Training 101: The Deadlift*, 2014, disponible sur <https://www.nerdfitness.com/blog/strength-training-101-the-deadlift/> (page consultée le 20/03/16).

BLANC J-P. Diététique du sportif. Que manger pour être en forme ? 7^{ème} Edition., Amphora Ed. Paris, France, 1997, 204 p.

BARTOLAMI S. Adaptation physiologique au stress, faculté des sciences Université de Montpellier, 2015, disponible sur <http://docplayer.fr/17950162-Adaptation-physiologique-au-stress.html> (page consultée le 15/07/16).

BERDANIER C.D., DWYER J.T., HEBER D. Handbook of nutrition and food. 3^{ème} Edition. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2014, pp. 199-226.

BERTHELOT A., ARNAUD M., REBA A. Le magnesium. John Libbey Eurotext Ed. Montrouge, France, 2004, 167 p.

BONJOUR J.P. Protein intake and bone health. International journal for vitamin and nutrition research, 2011, 81 (23), pp. 134-142.

CEDUS (Centre d'études et de documentation du sucre). Digestion et métabolisme des glucides. Collection sucre et santé, 2012, 11, 19 p.

CEN (Collège des enseignants de nutrition). Métabolisme protéique. 2010. [en ligne]. In : Université médicale Virtuelle Francophone, France. Disponible sur http://campus.cerimes.fr/nutrition/enseignement/nutrition_8/site/html/cours.pdf (page consultée le 13/11/16).

CERMAK N.M., RES P.T., DE GROOT L.C., SARIS W.H, VAN LOON L.J. Protein supplementation augments the adaptive response of skeletal muscle to resistance-type exercise training: a meta-analysis. The American journal of clinical nutrition, 2012, 96 (6), pp. 1454-1464.

CHENG J., LI B., MA P., LIU M., WANG Z. Synthesis and Properties of Macrocyclic Butanoic Acid Conjugates as a Promising Delivery Formulation for the Nutrition of Colon. The Scientific World Journal, 2013, 2013, 4 p.

CLAVEL-CHAPELON F., BOUTRON-RUAULT M-C. Viande, poisson et cancer colorectal. Médecine/ Sciences, 2005, 21 (10), pp. 866-867.

COMETTI G. Les méthodes de développement de la force. 2005. [en ligne]. In : Centre d'expertise de la performance, Dijon, France. Disponible sur <http://expertise-performance.u-bourgogne.fr/pdf/methodes2005.pdf> (page consultée le 10/06/16).

COMETTI G. Les mécanismes de la force. 2009. [en ligne]. In : Centre d'expertise de la performance, Dijon, France. Disponible sur http://www.suaps-lareunion.fr/files/activites/1256630310/La_force_selon_Cometti.pdf (page consultée le 17/10/16).

CUQ J-L. Biochimie des protéines, 1^{ère} année. 2006. [en ligne]. In : Université Montpellier 2, département sciences et technologies des industries alimentaires. Disponible sur <http://mon.univ-montp2.fr/claroline/backends/download.php?url=L0Jpb2NoX1Byb3RfSW50ZWdyZS5wZGY%3D&cidReset=true&cidReq=BIOCHPROT> (page consultée le 17/11/16).

DELAMARE J., DELAMARE V., DELAMARE-RICHE V. GARNIER M. Dictionnaire illustrée des termes de médecine. 28^{ème} Edition. MALOINE Ed. Paris, France, 2004, p. 892.

DELATTRE J., BEAUDEUX J-L., BONNEFONT-ROUSSELOT D. Radicaux libres et stress oxydant : aspects biologiques et pathologiques. Technique & Documentation Lavoisier Ed. Paris, France, 2007, pp. 1-80.

DELAVIER F. Guide des mouvements de musculation : Approche anatomique. 5^{ème} Edition. Vigot Ed. Paris, France, 2010, 194 p.

DELAVIER F., GUNDILL M. La méthode Delavier de musculation volume 2. Vigot Ed. Paris, France 2010. pp.158-161, pp.171-180, p. 351.

DELAVIER F., GUNDILL M. Guide des compléments alimentaires pour sportifs. 2^{ème} Edition. Vigot Ed. 2012, 170 p.

DEFRAIGNE J.O., PINCEMAIL J. Stress oxydant et anti-oxydants : mythes et réalités. Revue Médicale de Liège, 2008, 63, pp. 10-19.

DREYER H.C., FUJITA S., CADENAS J.G., CHINKES D.L., VOLPI E., RASMUSSEN B.B. Resistance exercise increases AMPK activity and reduces 4E-BP1 phosphorylation and protein synthesis in human skeletal muscle. The Journal of Physiology, 2006, 576 (2), pp. 613-624.

DREYER H.C., DRUMMOND M.J., PENNING S., FUJITA S., GLYNN E.L., CHINKES D.L., DHANANI S., VOLPI E., RASMUSSEN B.B. Leucine-enriched essential amino acid and carbohydrate ingestion following resistance exercise enhances mTOR signaling and protein synthesis in human muscle. American Journal of Physiology Endocrinology and Metabolism, 2007, 294 (2), pp. 392-400.

DUBOIS V., BRETON S., LINDER M., FANNI J., PARMENTIER M. Proposition de classement des sources végétales d'acides gras en fonction de leur profil nutritionnel. OCL (Oilseeds & fats, Crops and Lipids) Journal, 2008, 15 (1), pp. 56-75.

DUCHATEAU J., SEMMLER J., ENOKA R. Training adaptations in the behavior of human motor units. Journal of applied physiology, 2006, 101 (6), pp. 1766-1775.

EFSA (European Food Safety Authority). Scientific Opinion on Dietary Reference Values for protein. EFSA Journal, 2015, 10 (2), 66 p.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Protein Quality Evaluation. . FAO Food and nutrition paper, 1991, 51, 66 p.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Dietary Protein quality evaluation in human nutrition. FAO Food and nutrition paper, 2011, 92, 66 p.

FFFORCE (Fédération française de force). Règlement sportif de la force athlétique, du *powerlifting*, du développé couché et du *bench press* édition 2015/2016, chapitre I, disponible sur <http://www.fffforce.fr/reglement-national/> (page consulté le 04/03/16).

FFHMFAC (Fédération française d'haltérophilie, de musculation, de force athlétique et de culturisme). Statistiques Nationales de Licenciés, 2014, disponible sur <http://www.ffhaltero.fr/La-Federation/Statistiques> (pages consultées le 01/04/16).

FREDOT E. Connaissance des aliments, bases alimentaires et nutritionnelles de la diététique. Technique & Documentation Ed. Paris, France, 2005, 397 p.

FULLER N.R., SAINSBURY A., CATERSON ID., MARKOVIC T.P. Egg Consumption and Human Cardio-Metabolic Health in People with and without Diabetes. *Nutrients* Ed, 2015, 7 (9), pp 7399-7420.

FUJITA S., DREYER H.C., DRUMMOND M.J., GLYNN E.L., CADENAS J.G., YOSHIZAWA F., VOLPI E., RASMUSSEN B.B. Nutrient signalling in the regulation of human protein synthesis. *The Journal of Physiology*, 2007, 582 (2). 2007, pp. 813-823.

GARDES-ALBERT M., BONNEFONT-ROUSSELOT D., ABEDINZADEH Z., JORE D. Espèces réactives de l'oxygène, comment l'oxygène peut-il devenir toxique ? L'actualité chimique, Société Française de Chimie Ed., 2003, 270, pp. 91-96.

GREENHAFF P.L., KARAGOUNIS L.G., PEIRCE N., SIMPSON E.J., HAZELL M., LAYFIELD R., WACKERHAGE H., SMITH K., ATHERTON P., SELBY A., RENNIE M.J. Disassociation between the effects of amino acids and insulin on signaling, ubiquitin ligases, and protein turnover in human muscle. *American journal of physiology, endocrinology and metabolism*, 2008, 295 (3), pp. 595-604.

GRIGONIS R. York Barbell Museum & USA Weightlifting Hall of Fame (York, Pennsylvania), 2012, disponible sur http://www.interestingamerica.com/2012-03-31_USA-Weightlifting-Hall-of-Fame_by_Grigonis.html (page consultée le 13/03/16).

GROUSSARD C. Stress oxydatif et exercice anaérobie. *Sciences & Sports*, 2006, 21, pp. 62-67.

GWR (Guinness World Records). Heaviest right hand deadlift – bar, disponible sur <http://www.guinnessworldrecords.com/world-records/heaviest-right-hand-deadlift-bar> (page consultée le 10/04/16).

HALENG J., PINCEMAIL J., DEFRAIGNE J.O., CHARLIER C., CHAPELLE J.P. Le stress oxydant. *Revue Médicale de Liège*, 2007, 62 (10), pp. 628-638.

HAS (Haute Autorité de Santé). Prévention, diagnostic et traitement de l'ostéoporose. Note de synthèse, 2006, 7 p.

HAS (Haute Autorité de Santé). Unité clinique du dosage de la vitamine D. Note de Cadrage, 2013, 95 p.

HATOT S. Le mot de Mr. Stéphane Hatot, Président de la Fédération Française de Force, 2015, disponible sur : <http://www.fffforce.fr/2015/08/06/le-mot-de-mr-stephane-hatot-president-de-la-federation-francaise-de-force/> (page consultée le 18/03/16).

HATOT S. Lettres ouvertes numéro 1, 2, 3, 5 du Président de la Fédération de Force aux Force-Athlétistes, 2015, disponible sur <http://www.fffforce.fr> (pages consultées le 18/03/16).

HELMS E., VALDEZ A., MORGAN A. The muscle and strength nutrition pyramid. Ebook, 2015, 126 p.

HULMI J.J., LAAKSO M., MERO A.A., HAKKINEN K., AHTIAINEN J.P., PELTONEN H. The effects of whey protein with or without carbohydrates on resistance training adaptations. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*, 2015, 12 (45), pp. 12-48.

IFN (Institut français de nutrition). Les protéines : le métabolisme et les besoins protéiques chez l'homme. Dossier scientifique de l'IFN, 1997, 1(9), 195 p.

IFN (Institut français de nutrition). Les protéines : caractéristiques des différentes sources de protéines alimentaires. Dossier scientifique de l'IFN, 1997, 2 (9), 91 p.

IKEGAWA S., FUNATO K., TSUNODA N., KANEHISA H., FUKUNAGA T., KAWAKAMI Y. Muscle force per cross-sectional area is inversely related with pennation angle in strength trained athletes. *Journal of strength and conditioning research*, 2008, 22 (1), pp. 128-131.

IPC POWERLIFTING (International Paralympic Committee). About the sport, 2016, disponible sur <https://www.paralympic.org/powerlifting/about> (page consultée le 17/09/16).

IPF (International Powerlifting Federation). Technical Rules Book 2016, disponible sur : http://www.powerliftingipf.com/fileadmin/ipf/data/rules/technicalrules/english/IPF_Technical_Rules_Book_2016__1_.pdf (page consultée le 04/03/16).

IPF (International Powerlifting Federation). Approved list of apparel and equipment for use at IPF sanctioned competitions, 2016, disponible sur http://www.powerlifting-ipf.com/fileadmin/ipf/data/rules/approved-list/IPF_Approved_List_01.02.2016V1.pdf (page consultée le 04/03/16).

IWGA (International World Game Association). Powerlifting, 2016, disponible sur: <https://www.theworldgames.org/the-sports/sports/strength-sports/powerlifting> (page consultée le 04/03/16).

JENTJENS R., JEUKENDRUP A. Determinants of post-exercise glycogen synthesis during short-term recovery. *Sports medicine*, 2003, 33 (2), pp. 117-144.

JONES P.J. Dietary cholesterol and the role of cardiovascular disease in patients: a review of the Harvard Egg study and other data. *International journal of clinical practice supplement*, 2009, 63, pp. 1-8.

KAWAKAMI Y., ABE T., FUKUNAGA T. Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *Journal of applied Physiology*, 1993, 74 (6), pp. 2740-2744.

KELLER R. Lettre de Reconnaissance de la FFForce par l'IPF, 2015, disponible sur <http://www.fffforce.fr/2015/07/27/ipf-reconnait-la-fffforce/> (page consultée le 18/03/16).

KENNEY W-L., WILMORE J-H., COSTILL D-L. Physiologie du sport et de l'exercice. Traduction de la 5^{ème} édition américaine. De Boek Université Ed. Paris, France, 2013, 579 p.

KOBERICH H. European Powerlifting Pictures, 2002, disponible sur <http://archive.powerlifting.org/pictures7.htm> (page consultée le 01/06/16).

KOBERICH H. European Powerlifting Pictures, 2002, disponible sur <http://archive.powerlifting.org/pictures6.htm> (page consultée le 01/06/16).

KOBERICH H. European Powerlifting Pictures, 2003, disponible sur <http://archive.powerlifting.org/pictures3.htm> (page consultée le 01/06/16).

KOMI P.V. Strength and Power in Sport, The Encyclopaedia of sports medicine: an IOC medical commission publication. Volume III (2). Blackwell Science Ltd Ed. Oxford, UK, 2003, 523 p.

KUBO K., KANEHISA H., FUKUNAGA T. Effects of resistance and stretching training programmes on the viscoelastic properties of human structures in vivo. The Journal of physiology, 2002, 538 (1), pp. 219-226.

LANDRIER J.F. La vitamine D : sources, métabolisme et mécanismes d'action. OCL (Oilseeds & fats Crops and Lipids) Journal, 2014, 21 (3), 7 p.

LA NUTRITION.FR. Quel magnésium choisir, 2015, disponible sur <http://www.lanutrition.fr/bien-comprendre/les-complements-alimentaires/les-principaux-complements-alimentaires/les-complements-correcteurs-de-l-alimentation/le-magnesium/quel-magnesium-choisir.html> (page consultée le 27/01/17).

LECA R. Les principes de l'entraînement, 2016. [en ligne]. In : UFR STAPS (Faculté des sciences du sport) Dijon- Le Creusot, France, disponible sur <http://www.culturestaps.com/cyclisme-performance/> (page consultée le 11/07/16).

LEGEARD E., TEXIER J. Force : entraînement & musculation. Amphora Ed. Paris, France, 2005, 211 p.

LEON P. La surcompensation! disponible sur http://pacomeleon.re/wordpress/?page_id=551 (page consultée le 14/07/16).

LEGER C-L., RAZANAMAHEFA L. Risques et bénéfices pour la santé des acides gras trans apportés par les aliments : recommandations. OCL (Oilseeds & fats, Crops and Lipids) Journal, 2005, 12 (1), pp. 61-67.

MAITRE S. Développement et évaluation des qualités musculaires, colloque LRAHMFAC (Ligue Rhône-Alpes d'haltérophilie, de musculation, de force athlétique et de culturisme) Lyon. 2013, disponible sur <http://slideplayer.fr/slide/1134594/> (page consultée le 10/08/16).

MALCHAIR P., VAN OVERMEIRE L., BOLAND A., SALMON E., PIERARD L., SEUTIN V. Le Coenzyme Q10 : biochimie, physiopathologie de sa carence et intérêt potentiel d'une augmentation de ses apports. Revue Médicale de Liège Ed., 2005, 60 (1), pp. 45-51.

MENGUAL R. Métabolisme du cholestérol. UE Nutrition, biochimie, Université Nice-Sophia Antipolis, faculté de médecine, 2012, 10 p.

MENGUAL R. Métabolisme des Eicosanoïdes. UE Appareil locomoteur, biochimie, Université Nice-Sophia Antipolis, faculté de médecine, 2012, 11 p.

MORIN O., PAGES-XATART-PARES X. Huiles et corps gras végétaux : ressources fonctionnelles et intérêt nutritionnel. OCL (Oilseeds & fats Crops and Lipids) Journal, 2012, 19 (2), pp 63-75.

MOORE D.R., ROBINSON M.J., FRY J.L., TANG J.E., GLOVER E.I., WILKINSON S.B., PRIOR T., TARNOPOLSKY M.A., PHILLIPS S.M. Ingested protein dose response of muscle and albumin protein synthesis after resistance exercise in young men. The American Journal of Clinical Nutrition, 2008, 89 (1), pp. 161-168.

MOSONI P. Dégradation des fibres alimentaires par le microbiote colique de l'Homme. INRA (Institut national de la recherche agronomique), Innovations Agronomiques, 2014, 36, pp 83-96.

NACIRI M.W., ROI G.S., LANDONI L., MINETTI A.E., CERRETELLI P. Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. European journal of applied physiology and occupational physiology, 1989, 59 (4), pp. 310-319.

NAIR R., MASEEH A. Vitamin D: The « sunshine » vitamin. Journal of Pharmacology and Pharmacotherapeutics, 2012, 3 (2), pp.118-126.

NARVAEZ I.T. Bench Press Technique for Powerlifting, 2014, disponible sur <https://www.powerliftingtowin.com/powerlifting-technique-how-to-bench-press/> (page consultée le 05/06/16).

NAU F., NYS Y., YAMAKAWA Y., REHAULT-GODBERT S. Intérêt nutritionnel de l'œuf en alimentation humaine. INRA (Institut nationale de la recherche agronomique), Productions Animales, 2010, 23 (2), pp. 225-236.

NESTERENKO A. Étude et fonctionnalisation de protéines végétales en vue de leur application en microencapsulation. Thèse de doctorat d'université. Toulouse : Institut National Polytechnique de Toulouse, 2012, pp. 39-43.

NYS Y., SAUVEUR B. Valeur nutritionnelle des œufs. INRA (Institut nationale de la recherche agronomique), Productions Animales, 2004, 17 (5), pp. 385-393.

PERES G. Dépense énergétiques et activités physiques et sportives. 2016. [en ligne]. In : Faculté de médecine Pierre et Marie Curie, Pitié Salpêtrière, Paris, France, disponible sur <http://www.chups.jussieu.fr/polys/dus/dusmedecinedusport/dupromotionsportetsante2011/DUNS-GP-Depense%20energetique-mars2010pdf.pdf> (consultée le 31/10/16).

PERIAULT A. Les Français manquent de magnésium. 2011, disponible sur <http://www.lanutrition.fr/bien-comprendre/les-complements-alimentaires/les-principaux-complements-alimentaires/les-complements-correcteurs-de-l-alimentation/le-magnesium/les-francais-manquent-de-magnesium.html> (page consultée le 23/01/17).

POUILLART P.R. Role of butyric acid and its derivatives in the treatment of colorectal cancer and hemoglobinopathies. Life Sciences, 1998, 63 (20), pp. 1739-1760.

POUSSON M., VAN HOECKE J., GOUBEL F. Changes in elastic characteristics of human muscle induced by eccentric exercise. Journal of biomechanics, 1990, 23 (4), pp. 343-348.

PREVOST P. Effets de l'entraînement : la surcompensation. Sport, santé et préparation physique, 2003, 6, pp. 4-5.

RICHE D. Diététique et micronutrition des sports de force. Cahier de nutrition et de diététique, 2005, 40 (6), pp. 334-339.

RIPPETOE M., BAKER A. Practical Programming for Strength Training. 3^{ème} Edition. The Aasgaard company, Wichita Falls, Texas, USA, 2013, 256 p.

ROBERT J. Le guide des boissons de l'effort, 2016, disponible sur <http://www.lanutrition.fr/bien-dans-sa-sante/sport/l-hydratation-du-sportif/le-guide-des-boissons-de-l-effort.html> (page consultée le 27/02/17).

RUALES J., NAIR BM. Nutritional quality of the protein in quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd) seeds. Plant foods for human nutrition, 1992, 42 (1), 11 p.

SALE D.G. Neural adaptation to resistance training. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1988, 20 (5), pp. 135-145.

SALLE B. Statut vitaminique, rôle extra osseux et besoins quotidiens en vitamine D. Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine, 2012, 196 (4-5), pp. 1011-1015.

SCHAAFSMA G. The Protein Digestibility-Corrected Amino Acid Score. The Journal of Nutrition, 2000, 130 (7), pp. 1865-1867.

SCHOENFELD B.J. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. The Journal of Strength and Conditioning Research, 2010, 24 (10), pp. 2857-2867.

SCHOENFELD B.J., ARAGON A.A., KRIEGER J.W. The effect of protein timing on muscle strength and hypertrophy: a meta-analysis. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2013, 10 (1), pp. 10-53.

SLATER G., STUART M-P. Nutrition guidelines for strength sports: Sprinting, weightlifting, throwing events and, bodybuilding. Journal of Sports Sciences, 2011, 29 (1), pp 67-77.

SCHWOB M. Le magnésium une médecine sur mesure. Leduc.s Ed. Paris, France, 2015, 157 p.

SOUBERBIELLE J.C. Effets classiques et non classiques de la vitamine D. Correspondances en Métabolismes Hormones Diabètes et Nutrition, 2011, 15 (6), pp. 186-190.

STETSENKO A. Championships Records 2016. [en ligne]. In: IPF (International Powerlifting Federation) Differdange, Luxembourg, disponible sur: <http://www.powerlifting-ipf.com/championships/records.html> (pages consultées le 10/04/16).

SUTPHIN P. Powerlifting: The Total Package. Author House LLC Ed. Bloomington, USA, 2014, 448 p.

TANG J.E., MOORE D.R., KUJBIDA G.W., TARNOPLSKY M.A., PHILLIPS S.M. Ingestion of whey hydrolysate, casein, or soy protein isolate: effects on mixed muscle protein synthesis at rest and following resistance exercise in young men. *Journal of Applied Physiology*, 2009, 107 (3), pp. 987-992.

TARNOPLSKY M.A., ATKINSON S.A., MACDOUGALL J.D., CHESLEY A., PHILLIPS S., SCHWARCZ H.P. Evaluation of protein requirements for trained strength athletes. *Journal of Applied Physiology*, 1992, 73 (5), 1992, pp. 1986-1995.

THOMAS D., GONZALEZ M.C., PEREIRA A-Z., REDMAN L.M., HEYMSFIELD S.B. Time to correctly predict the amount of weight loss with dieting. *Journal of the academy of nutrition and dietetics*, 2014, 114 (6), pp. 957-861.

TIOLLIER E. Dossier nutrition et performance sportive. INSEP (Institut national du sport, de l'expertise et de la performance) *Le mag*, 2015, 9, pp. 5-11.

TODD J. From Milo to Milo: A History of Barbells, Dumbells, and Indian Clubs. *Iron Game History*, 1995, 3(6), 16 p.

TODD J. "Chaos Can Have Gentle Beginnings" The Early History of the Quest for Drug Testing in American Powerlifting: 1964-1984. *Iron Game History*, 2004, 8(3), 20 p.

TURGEON-DESROCHES J. Sureentraînement, quand s'arrêter. 2016, disponible sur <http://www.studiolocotion.com/fr/blog/article/sureentrainement-quand-s-arreter/> (page consultée le 14/07/16).

UNITT J. The History of the International Powerlifting Federation. 2016. [en ligne]. In : IPF (International Powerlifting Federation), Differdange, Luxembourg, disponible sur <http://www.powerlifting-ipf.com/federation/history.html> (page consultée le 13/03/16).

VENESSON J. Nutrition de la force. Thierry Souccar Ed. Vergèze, France, 2011, 165 p.

VERNAY M., SPONGA M., SALAVANE B., OLEKO A., DESCHAMPS V., MALON A., CASTETBON K. Statut en vitamine D de la population en France : l'Etude nationale nutrition santé (ENNS, 2006-2007). *Bulletin épidémiologique hebdomadaire de l'institut de veille sanitaire*, 2012, 16-17, pp. 189-194.

VIRU A. Adaptation in Sports Training. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 1995, pp. 1-6.

VIRTANEN J.K., MURSU J., VIRTANEN H.E.K., FOGELHOLM M., SALONEN J.T., KOSKINEN T.T., VOUTILAINEN S., TUOMAINEN T-P. Associations of egg and cholesterol intakes with carotid intima-media thickness and risk of incident coronary artery disease according to apolipoprotein E phenotype in men: the Kuopio Ischaemic Heart Disease Risk Factor Study. *The American journal of clinical nutrition*, 2016, 103, pp. 895-901.

VOUILLOT M. Le développé-couché, épreuve de force. *PowerMag*, 2000, 4, pp.12-13.


WARPEHA J.A History of Powerlifting in the United States: 50 Years after York. 2015. [en ligne]. In : USA Powerlifting, Minnesota, USA, disponible sur <http://www.usaplmn.com/wp-content/uploads/2014/04/History-of-Powerlifting-Warpeha-9-4-15.pdf> (page consultée le 13/03/16).

WHO (World Health Organization). Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition. WHO Technical Report Series, 2007, 935, 265 p.

YLITALO-JAMES E. The Squat. 2012, disponible sur <http://www.britishpowerliftingunion.co.uk/the-squat/> (page consultée le 20/03/16).

DEMANDE D'IMPRIMATUR

Date de soutenance : 06 JUILLET 2017

<p align="center">DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE</p> <p>présenté par : SPINDLER JULIEN</p> <p><u>Sujet</u> : Nutrition et force athlétique : comprendre la physiologie de l'effort de force afin d'établir des stratégies nutritionnelles spécifiques</p> <p><u>Jury</u> :</p> <p>Président : Pr Béatrice FAIVRE, Professeur des Universités Directeur : Dr Emilie VELOT, Maître de Conférences Juges : Dr Natacha DREUMONT, Maître de Conférences Dr Anne Sylvie HINZELIN, Pharmacien</p>	<p align="right">Vu, Nancy, le 30.05.2017</p> <p align="center">Le Président du Jury Directeur de Thèse</p> <p align="center">  M.ve FAIVRE M.ve VELOT  </p>
<p align="center">Vu et approuvé, Nancy, le 08.06.2017</p> <p align="center">Doyen de la Faculté de Pharmacie de l'Université de Lorraine,</p> <p align="center">  Francine PAULUS </p>	<p align="right">Vu, Nancy, le 3.07.2017</p> <p align="center">Le Président de l'Université de Lorraine,</p> <p align="center">  Pierre MUTZENHARDT </p> <p align="right">N° d'enregistrement : 9900</p>

N° d'identification :

TITRE

Nutrition et force athlétique : comprendre la physiologie de l'effort de force afin d'établir des stratégies nutritionnelles spécifiques

Thèse soutenue le 06 juillet 2017

Par Julien SPINDLER

RESUME :

La force athlétique est, comme son nom l'indique, un sport de force. Les mouvements qui composent cette discipline (développé couché, soulevé de terre, flexion de jambes) doivent être effectués avec des charges très lourdes. Sa pratique engendre donc de fortes contraintes sur l'organisme et peut être très traumatisante.

L'entraînement permet d'améliorer les performances. Les méthodes employées reposent sur le principe de surcharge progressive. La répétition des mouvements avec des charges de plus en plus importantes engendre une surcompensation du corps à l'origine des progrès. Afin de supporter au mieux ces stress, l'organisme s'adapte en renforçant ses structures physiologiques effectrices (muscles, tendons) et en améliorant leur contrôle nerveux.

Afin de soutenir ces changements, de permettre une récupération optimale et de limiter au maximum les risques de blessures et de fatigues, la nutrition du sportif se doit d'être adaptée. Une détermination préalable de la dépense énergétique journalière paraît essentielle afin d'ajuster l'apport calorique aux objectifs personnels. Passé cette étape, la répartition des calories via les macronutriments doit être pensée de manière individuelle mais aussi en tenant compte de la spécificité de ce sport. Les composés micronutritionnels ne sont pas à oublier afin de satisfaire à la hausse des besoins en vitamines et minéraux ainsi qu'en composés anti-oxydants. Traduire ces données théoriques en choix alimentaires concrets est rendu possible par la connaissance des différentes familles d'aliments, présentation qui a été faite au cours de cette thèse.

MOTS CLES : force athlétique, adaptation nutritionnelle, physiologie de l'effort

Directeur de thèse	Intitulé du laboratoire	Nature
Dr Emilie VELOT	UMR 7365 CNRS-Université de Lorraine, Ingénierie Moléculaire et Physiopathologie Articulaire (IMoPA)	Expérimentale <input type="checkbox"/>
		Bibliographique <input checked="" type="checkbox"/>
		Thème <input checked="" type="checkbox"/>

Thèmes

1 – Sciences fondamentales
3 – Médicament
5 - Biologie

2 – Hygiène/Environnement

4 – Alimentation – Nutrition

6 – Pratique professionnelle