



HAL
open science

Optimisation de la nutrition dans un objectif de prise de masse musculaire et d'accroissement des performances lors de la pratique de musculation

Chloé Ngo

► To cite this version:

Chloé Ngo. Optimisation de la nutrition dans un objectif de prise de masse musculaire et d'accroissement des performances lors de la pratique de musculation. Sciences pharmaceutiques. 2022. dumas-04080249

HAL Id: dumas-04080249

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04080249v1>

Submitted on 24 Apr 2023

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - ShareAlike 4.0 International License

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
UFR des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

**OPTIMISATION DE LA NUTRITION DANS UN OBJECTIF DE PRISE DE
MASSE MUSCULAIRE ET D'ACCROISSEMENT DES PERFORMANCES
LORS DE LA PRATIQUE DE MUSCULATION**

Thèse

Présentée à la Faculté de Pharmacie de Montpellier
en vue d'obtenir
le Diplôme d'Etat de Docteur en Pharmacie

Par

Chloé NGO

Soutenue le 28 septembre 2022

Président : Mme Karen Lambert Cordillac (*Professeur*)

Assesseurs : Mme Marie Héléne Guiraud (*Docteur en pharmacie*), Mme Mathilde Pic (*Docteur en pharmacie*).

Remerciements

L'écriture de cette thèse fut un long périple, un investissement certain, une période de stress et comme une peur constante qui retentit intérieurement. La peur de ne pas fournir un travail à la hauteur de ce que je l'espérais, la peur de ne pas finir à temps, la peur d'avoir omis des notions importantes... Et pourtant, nous en sommes là aujourd'hui. Mais il serait mentir que de dire que j'en suis arrivée là seule, sans l'aide de personne. Toutes ces heures passées devant mon écran, cherchant à déceler les moindres preuves de chaque phrase que j'avançais, toutes ces nuits et ces pauses déjeuner à la pharmacie passées à farfouiller tous les recoins de Pubmed, à connaître sur le bout des doigts Zotero et à taper sur mon clavier telle une pianiste seraient vain si je n'avais pas eu le soutien que l'on m'a donné.

“Éveiller et renforcer le plaisir de travailler chez le jeune Homme est la tâche la plus importante pour les éducateurs. Seule une telle base conduit au bonheur de posséder l'un de ces biens les plus précieux du monde : la connaissance ou l'habileté artistique.”

- Albert Einstein.

Ainsi, c'est sur ces paroles de ce grand physicien que je tenais à remercier la faculté de Pharmacie de Montpellier qui m'a permis d'atteindre mon objectif de devenir pharmacienne.

Je remercie Mme LAMBERT CORDILLAC Karen, ma directrice de thèse et présidente du jury, d'avoir accepté de me suivre dans cette aventure et pour son implication. Sa connaissance sur la nutrition et sur le domaine du sport ainsi que son expérience en termes de recherches scientifiques ont été de grands piliers lors de l'écriture de cette thèse. Merci d'avoir donné tout votre possible pour que ce travail puisse être présenté en temps et en heure.

Je remercie Mme GUIRAUD Marie Hélène, de m'avoir prise sous son aile et pour qui j'ai pu travailler depuis maintenant 3 années. 3 années extrêmement formatrices au cours desquelles j'ai pu acquérir de nombreuses connaissances et une qualité de travail nettement meilleure, alors même que je commence ma carrière. Une titulaire qui sait bien gérer son entreprise fleurissante tout en n'oubliant pas le côté humain.

Je remercie également Mlle PIC Mathilde, pharmacienne issue de ma promo et tout autant passionnée de musculation que je le suis, avec qui j'ai pu converser à de nombreuses reprises à ce sujet et aussi sur le domaine de la nutrition sportive. Sa gentillesse, ses encouragements et son expérience toute fraîche sur l'écriture de thèse sont des atouts qui m'ont beaucoup aidé.

Au-delà de la connaissance de ses tuteurs pharmaciens et enseignants accomplis et ce qu'ils ont à nous enseigner dans ce périple, il ne faut pas négliger le soutien de son entourage proche. Selon Freud,

“La science moderne n'a pas encore produit de médicament tranquilisant aussi efficace que quelques mots bienveillants.”.

En ces termes, les premiers que je souhaiterais remercier sont les membres de ma famille : Mr. et Mme. NGO L. et C., Mr. et Mme. BARBIER S. et F., Mr. et Mme FAURÉ C. et A. qui m'ont toujours soutenu tout au long de mes études et qui m'ont inculqué de nombreuses valeurs ainsi que l'importance de la réussite, de l'ambition et d'aller au bout de mes aspirations. Leur propre réussite, au niveau personnel et professionnel, ont été une véritable source d'inspiration et continuera de l'être.

Parmi les membres de ma famille, j'accorde une attention particulière à mon frère, Mr NGO R., doctorant de la même faculté que la mienne et qui m'a dès le plus jeune âge transmis son amour du métier. Il est à ce jour un véritable modèle de pharmacien accompli auquel j'aspire être. Alors même que mes choix de carrière étaient encore troubles dans ma jeunesse, c'est en passant de longs moments à ses côtés, à l'écouter tergiverser sur son métier que le choix m'est paru évident : *“plus tard, je serai pharmacienne, comme toi”* pensais-je, alors même que je venais d'entamer ma première année au lycée. Et nous en sommes là aujourd'hui, quelques années plus tard, à la même place auquel il a été il y a de ça un petit moment, déclarant à mon tour le même serment de Galien qu'il a énoncé autrefois. Pour toutes ces raisons et bien plus encore, je le remercie.

Je tiens également à remercier Mr OURADOU F., qui a été d'un soutien sans faille, tant dans ma vie personnelle que professionnelle. Il est un véritable pilier et ses nombreux “Ta thèse !” ont été plus efficaces encore qu'un rappel d'alarme... Ses encouragements et mon souhait de le rendre fier de mon évolution m'ont mené à devenir la pharmacienne que je suis aujourd'hui. Je remercie également Mr. OURADOU et Mme SALAS pour leur soutien et leurs encouragements.

Je remercie également Mme NGUYEN C., ma collègue de pharma, ma binôme de TP, celle que j'ai failli tuer plus d'une fois en renversant de l'acide, de l'acétone où je ne sais quel

mélange avec le pictogramme de danger de mort inscrit dessus en salle de TP, celle qui a supporté mon stress constant au cours de mes études, et j'en passe... Le déroulement de mes années pharma auraient été tout autre sans sa présence. Sa maturité et son esprit réfléchi ont été d'un soutien sans précédent au cours de ces années et j'en ferai de même lorsqu'elle écrira à son tour ses pages de thèse.

Enfin, je tenais à adresser mes remerciements à l'ensemble de l'équipe de la PHARMACIE DE LA PLAGE de Valras Plage, et particulièrement Mme GUIRAUD Marie Hélène et Mme BAL Françoise. Une équipe dans laquelle les pharmaciens sont à l'image du "bon pharmacien" que j'avais en tête lorsque j'ai entrepris ces études et où les préparateurs dispensent avec la même qualité qu'un pharmacien expérimenté. Une attention particulière à Mme GUIRAUD M. qui a pris le temps de me transmettre ses nombreuses connaissances avec une pédagogie exemplaire, Mme SARCELLES J. dont le sourire et la bonne humeur rendent le travail bien plus agréable ainsi que Mme ESPINASSE V., ma « maman de la pharmacie », qui n'a eu de cesse de m'épauler lors de l'écriture de cette thèse. Grâce à toi, je « garde espoir ».

En espérant que la lecture de cette thèse vous aura appris des choses et éveillé votre curiosité sur ces mondes si vaste que sont la nutrition et la musculation.

Chloé NGO.

Table des matières

INTRODUCTION	9
PARTIE 1 : MUSCULATION ET HYPERTROPHIE MUSCULAIRE : MECANISMES ET FACTEURS EN JEU	10
A) LE MUSCLE STRIE SQUELETTIQUE	10
B) BASES DE MUSCULATION.....	11
C) ANABOLISME MUSCULAIRE	12
- Mécanisme d'action.....	12
- Facteurs favorisants	14
- Réparation tissulaire et gain de masse musculaire.....	22
D) CATABOLISME MUSCULAIRE.....	23
PARTIE 2 : PLAN ALIMENTAIRE DU SPORTIF DE FORCE	25
A) LES PROTEINES, UN MACRONUTRIMENT CLE AU SERVICE DE LA SYNTHESE DE PROTEINES MUSCULAIRES	25
- Rôle des protéines et recommandations nutritionnelles.....	25
- A quel moment ?.....	26
- Les sources de protéines : comment les choisir ?.....	28
- Protéines animales VS protéines végétales ?	30
- Qu'en est-il d'une consommation au-delà des recommandations ?.....	32
B) LES GLUCIDES.....	34
- Quelques notions préalables.....	34
- Intérêt des glucides chez un sportif de force	37
- Recommandations nutritionnelles.....	39
- A quel moment ?.....	39
C) LES LIPIDES	41
- Intérêts et recommandations nutritionnelles	41
- Lesquels privilégier ?.....	42
D) CALCULS DES BESOINS CALORIQUES ET REALISATION DU PLAN ALIMENTAIRE	43
Étape 1 : Le calcul du métabolisme basal et des calories dépensées quotidiennement.....	43
Étape 2 : Calcul des besoins caloriques journaliers.....	44
Étape 3 : Calcul des macronutriments.....	47
PARTIE 3 : COMPLEMENTES ALIMENTAIRES UTILES A LA PRISE DE MASSE MUSCULAIRE..	48
A) LES SUPPLEMENTS PROTEINES	48
• La whey.....	48
• La caséine	50
• Les protéines végétales	51
• Les gainers.....	54
→ Les protéines en poudre : laquelle choisir ?.....	56
B) LES AA UTILES A LA PRISE DE MASSE MUSCULAIRE	59
1. Les BCAA.....	59
2. Le HMB : un AA prometteur	64
3. La créatine comme booster de performances.....	67
Intérêts d'une supplémentation en créatine chez le sportif de force	67
Dose et moment de prise	69
Créatine en prise seule ?.....	71
Des répondeurs et des non répondeurs : les limites de la créatine.....	71
Effets indésirables.....	72
C) L'ESSENTIEL DE LA MICRONUTRITION CHEZ LE SPORTIF DE FORCE.....	72
1. Oméga 3.....	72
2. La vitamine D.....	74
3. Le magnésium.....	77
4. Les probiotiques.....	82

CONCLUSION..... 85
ANNEXE 1..... 87
SOURCES..... 88

Introduction ...

Le sport est crucial pour le maintien d'une santé durable et apparaît en première ligne, conjointement à la nutrition, dans ce que nous appelons aujourd'hui les mesures hygiéno-diététiques dont la visée est la prévention de maladies chroniques. Elle peut être une habitude du quotidien, une activité qu'on se "force" à faire si l'on veut s'inscrire dans ce que nous appelons aujourd'hui le culte du "*Healthy lifestyle*" ou du "*Wellness*" mais lorsque cette pratique sportive devient une réelle passion, nous cherchons constamment à vouloir nous surpasser, monter le niveau d'un cran. C'est notamment ce à quoi de nombreux sportifs pratiquant de la musculation se sont confrontés. Ce qui, à l'origine, devait être une pratique pour simplement "se maintenir en forme" devient très vite une obsession du "gagner plus de muscle, de force et ce, en un minimum de temps". En effet, nous vivons dans une ère où l'on veut tout, et très vite.

Dans cette optique, il apparaît clair que pour un gain de masse musculaire naturel dans un temps minimal, la composition de l'assiette est un élément majeur, conjointement à une pratique régulière. Il n'y a pas de secret, une bonne alimentation favorise la prise de masse musculaire en dehors de la pratique mais elle permettrait aussi un gain de performances au moment même de la pratique.

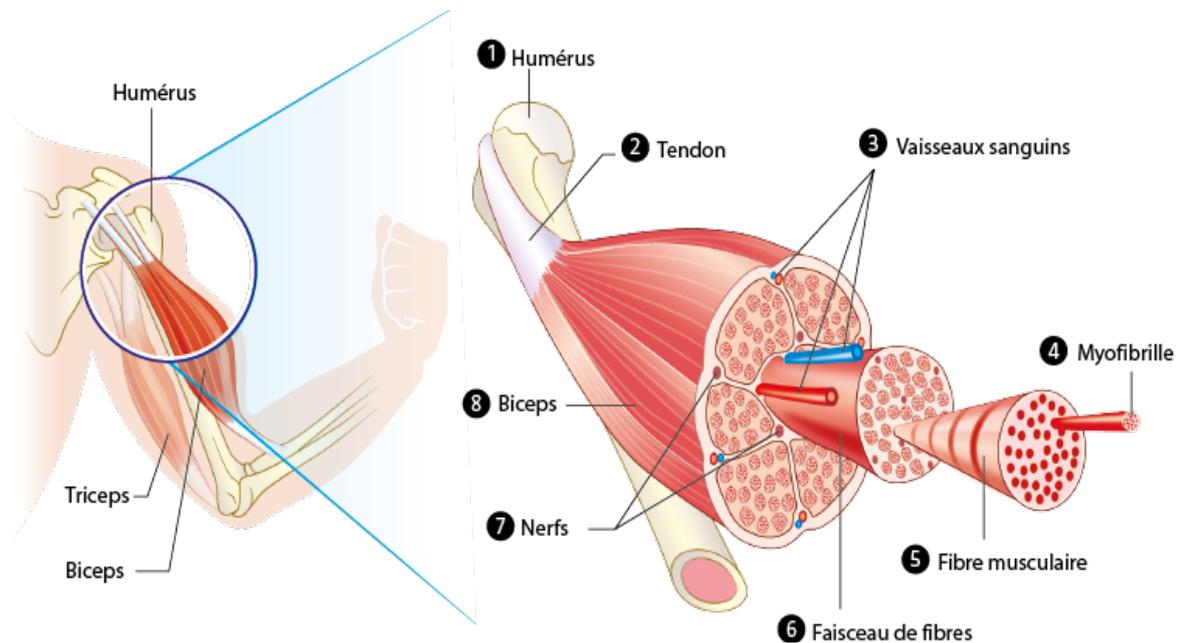
Mais comment s'y prendre ? En quelles quantités ? A quel moment ? Existe-t-il des compléments alimentaires à privilégier par rapport à d'autres en vue de cet objectif ? La nutrition du sportif de force devient alors tout un art, et comprendre l'utilité de chaque aliment que l'on peut retrouver dans son régime est crucial pour assurer un gain de masse musculaire significatif sans risquer une prise de masse grasseuse trop importante voire dangereuse pour la santé. Au cours de cette thèse, nous allons voir quels sont les points clés pour optimiser au mieux l'alimentation en vue d'accroître les performances au moment de la séance de musculation mais aussi pour un bon anabolisme lors de la période de repos. De la bonne quantité de macronutriments à consommer, jusqu'aux compléments alimentaires à privilégier, cette thèse regroupe « l'essentiel de la nutrition du pratiquant de musculation pour la prise de masse musculaire ».

Bien évidemment, les performances sportives sont également affectées par les maux du quotidien, l'état d'esprit, le sommeil, etc... mais ce sont des points que j'ai volontairement choisi de ne pas traiter au sein de cette thèse. De même pour les méthodes "moins naturelles" et bien souvent détournés de leur usage initial qui existe actuellement sur le marché.

Partie 1: Musculation et hypertrophie musculaire : mécanismes et facteurs en jeu

Cette première partie a pour but d'éclairer certains questionnements sur la manière dont notre organisme réalise la synthèse des protéines musculaires suite à un entraînement régulier de musculation. Comprendre comment parvenir à cette fin, c'est avoir les clés nécessaires pour moduler par la suite son alimentation et l'optimiser au maximum, le tout dans un objectif de prise de masse musculaire.

a) Le muscle strié squelettique



En premier lieu, il est important de comprendre la constitution d'un muscle avant d'aborder la manière dont il faut procéder pour le faire prendre en volume (=hypertrophie). Nous allons nous intéresser au cours de cette thèse aux muscles striés squelettiques (NB : désormais, les autres types, lisses et cardiaques, seront mis à part lors de la mention du terme "muscle").

Un muscle est composé de faisceaux de fibres musculaires regroupés au sein d'une gaine. Ces fibres musculaires sont elles même entourées par du tissu conjonctif. Chaque fibre musculaire est dotée de plusieurs noyaux, de fibres capillaires sanguins nécessaires à l'approvisionnement en oxygène et en glucose et d'une terminaison nerveuse pour faire le lien avec le cerveau. Chacune des fibres musculaires sera elle-même composée de myofibrilles où se côtoient des myofilaments fins (ou actine) et myofilaments épais (ou myosine). Les filaments d'actine sont rattachés à la strie Z et ces dernières permettent de délimiter des compartiments nommés sarcomères (=unité contractile du muscle). Lors d'une contraction musculaire, la tête des filaments de myosines vont s'accrocher aux filaments d'actine et former des ponts actine-

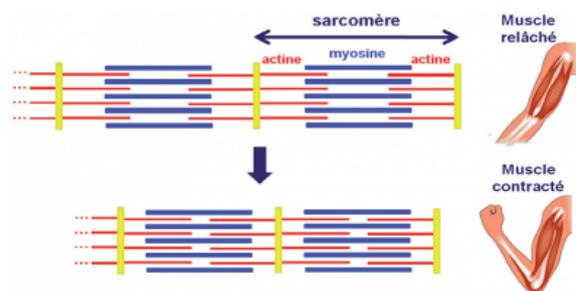


Fig. 1 : contraction musculaire

myosine. Les mouvements de la myosine sur l'actine vont provoquer la contraction (**Figure 1**) [1]

Il en existe 3 différentes : la contraction ...

- Concentrique : muscles et tendons se raccourcissent
- Isométrique : raccourcissement des muscles mais étirement des tendons
- Excentrique : allongement muscles-tendons. [2]

b) Bases de musculation

Avant d'aborder le processus de synthèse de protéines musculaires, il est important d'expliquer certains termes propres à la pratique. La musculation est une activité physique qui repose sur un enchaînement d'exercices (ex : le squat, soulevé de terre, biceps curl, ...) réalisées sous forme de séries, elles même composées de répétitions d'un même mouvement. Chaque série sera espacée d'une courte période (généralement 1 à 2 minutes) où le sportif pourra partiellement récupérer suite à l'effort fourni : c'est la période de repos (intra-training). L'individu peut choisir ou non d'ajouter une charge, mais dans un objectif d'hypertrophie la charge apparaît comme étant inévitable. D'ailleurs, Eftestol et al. (2016) [3] ont démontré *via* un modèle animal que l'hypertrophie musculaire serait plus importante par l'ajout de charges lors d'un exercice de résistance qu'au poids du corps, les deux effectués jusqu'à un l'échec (jusqu'à ce qu'il ne puisse plus faire de répétition supplémentaire pour une série donnée). Il existe aussi d'autres moyens de s'entraîner en musculation. On peut par exemple s'entraîner en faisant des 1 RM soit 1 répétition max : ici l'individu va tenter de trouver la charge maximale pour laquelle il n'est capable, pour un mouvement donné, de ne faire qu'une seule répétition. Il est également possible de faire varier son nombre de répétitions par séries afin de cibler des objectifs physiques différents, faire varier le tempo d'exécution de chaque mouvement, l'amplitude d'exécution peut être différente d'une personne à une autre, etc... Il est donc aisé de varier les entraînements en fonction des morphologies et capacités de chacun de la même manière qu'une prise de masse sera physiquement différente d'un pratiquant à un autre, à entraînement et alimentation équivalents (muscles plus ou moins longs chez certains, métabolismes différents faisant varier le taux de masse grasse, génétique, prédominance de l'activation de certains muscles plutôt que d'autres pour un même exercice du fait d'une anatomie qui diffère, ...).

L'activité physique provoque une augmentation des dépenses énergétiques. Au cours de l'exercice, le corps va puiser dans ses réserves de glucides, de lipides et enfin de protéines pour qu'il ait l'énergie nécessaire à l'exécution de la séance d'entraînement. La construction de la masse musculaire pour une personne entraînée s'effectue selon un continuum de destruction et de synthèse protéique. A titre très schématique, au cours d'une séance de musculation, on "déchire" le muscle (en réalité, on va étirer les fibres musculaires) par la contrainte exercée par la charge alors que lors de la période post-exercice (période de repos supérieure à 30 min), on va "construire" du muscle (activation de la synthèse de protéines musculaires, régénération tissulaire). Il y a alors une alternance entre catabolisme et anabolisme musculaire.

c) Anabolisme musculaire

- Mécanisme d'action

Un seul entraînement de résistance peut provoquer à lui seul une synthèse de protéines musculaires, qui sera plus ou moins importante en fonction de l'état d'entraînement du sujet, de son alimentation, de son hydratation et de sa récupération. Au cours de l'exercice, il y a une alliance entre la charge qui exerce une pression mécanique et la force contractile exercée par nos muscles pour la soulever.

On appelle mécanotransduction la transformation d'un stress mécanique en un signal biochimique à l'origine d'une signalisation intracellulaire anabolique (faisant référence ici à une synthèse de protéines musculaires).

Le complexe mTORC1

L'étude de Drummond et al. en 2009 [5] permet de démontrer l'importance du complexe mTORC1 (Mammalian Target of Rapamycin Complex 1) dans la synthèse protéique en mettant des sportifs en présence ou en absence de rapamycine (inhibiteur de mTOR) lors d'un exercice de musculation. L'administration de rapamycine a diminué la synthèse précoce de protéines lors de la période de contraction musculaire mais a aussi amenuisé l'activité d'autres éléments. Cette synthèse est, au contraire, accrue si :

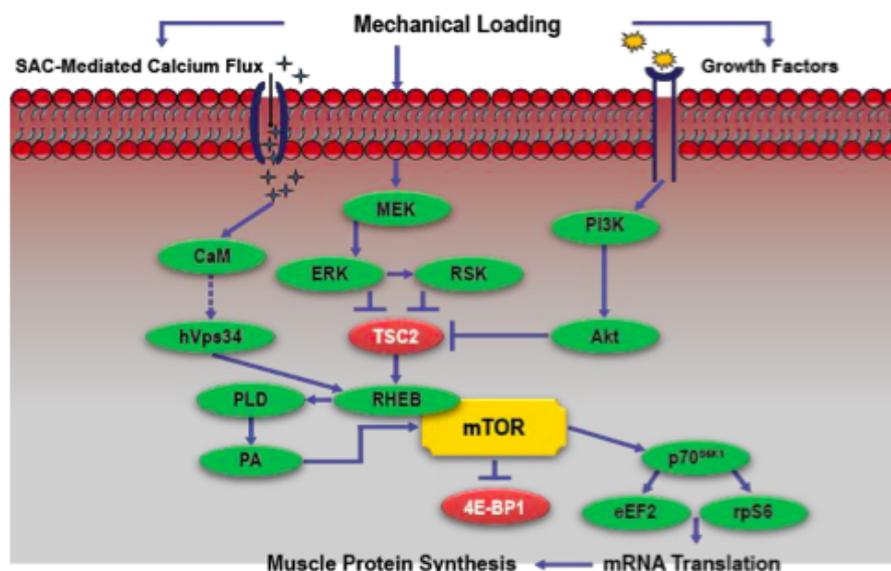
- La charge soulevée est lourde : facteur qui varie selon l'individu et son état plus ou moins entraîné (Baar et Esser 1999, Terzis et al. 2010) [4],
- L'afflux sanguin vers les muscles diminue (indépendant de la charge)
- Et/ou bien si l'individu réalise des séries jusqu'à l'échec (Fujita et al. 2007) [4]

Il existe deux complexes mTORC1 et mTORC2 mais nous allons surtout nous intéresser ici à mTORC1 car c'est celui qui a un impact majeur sur la synthèse protéique lors d'exercices de force. mTORC1 est un complexe protéique comprenant la sérine/thréonine kinase mTOR de 289 kDa avec plusieurs protéines régulatrices (raptor, mLST8 (mammalian lethal with sec13 protein 8), deptor (DEP domain-containing mTOR-interacting protein) et PRAS40 (proline-rich Akt substrate of 40-kDa). Sa présence est cytosolique mais il peut parfois être amené à migrer à la surface des lysosomes en présence d'acides aminés.

mTOR contrôle lui-même plusieurs protéines impliquées dans la synthèse protéique : p70s6k (p70 ribosomal S6 kinase),

- 4E-BP1 (eukaryotic initiation factor 4E-binding protein 1),
- eIF4G (eukaryotic initiation factor 4G).

Un stimulus anabolique (*cf. facteurs favorisants*) va engendrer la phosphorylation de mTOR entraînant alors entre autres celle de S6K1 (la kinase ribosomale S6) qui à son tour va phosphoryler la protéine ribosomale S6 et la kinase du facteur d'élongation eucaryote 2 (eEF2) (**Figure 2**). L'initiation de la traduction est alors activée.



Stimulators of muscle protein synthesis depicted in green, whereas inhibitory proteins are depicted in red. Abbreviations: SAC, stretch activated ion channels; MEK, mitogen activated protein kinase kinase; ERK, extracellular signal-regulated kinase; RSK, ribosomal protein kinase; CaM, calcium/calmodulin; hVps34, human vacuolar protein sorting-34; PI3K, phosphatidylinositol 3-kinase; Akt, protein kinase B; TSC2, tuberous sclerosis complex; RHEB, Ras homolog enriched with brain; mTOR, mammalian target of rapamycin; PLD, phospholipase D; PA, phosphatidic acid; 4E-BP1, eukaryotic initiation factor 4E-binding protein 1; p70^{S6K1}, 70-kDa ribosomal protein S6 kinase 1; eEF2, eukaryotic elongation factor 2; rpS6, ribosomal protein S6.

Fig.2 : Schémas de la mécanotransduction inhérente au stimulus anabolique

Source : Drummond MJ, Fry CS, Glynn EL, Dreyer HC, Dhanani S, Timmerman KL, Volpi E & Rasmussen BB. (2009). Rapamycin administration in humans blocks the contraction-induced increase in skeletal muscle protein synthesis. *J Physiol* 587, 1535-1546.

La voie des MAPK

Il existe également une autre voie pour la synthèse de protéines musculaires : celle des MAPK, sous l'influence des hormones de croissance, du stress engendré par l'exercice de force et de l'inflammation dont il est à l'origine.

Sa cascade de signalisations implique :

- ERK 1 / 2 (kinase induite par les signaux extracellulaire 1 et 2),
- p38 MAPK,
- Les JNK (kinases c-Jun NH2-terminales),
- ERK5.

Lorsque MAPK et mTORC1 sont activés en même temps, une synthèse de protéines musculaires se produit (Drummond et al. 2009) [5]. Aussi, dans cette même étude, la présence de rapamycine a bloqué la phosphorylation de la S6K1 impliqué dans la voie mTOR, arrêté celle d'ERK1/2 et en a diminué celle de MNK1 (MAPK interacting serine/threonine kinase 1). Par contre, la phosphorylation d'eIF4E (une cible de MNK1), n'a pas été affectée par cette administration de rapamycine, ce qui nous permet d'affirmer que la voie mTOR n'interfère pas directement avec la signalisation MAPK. Au contraire, l'activation d'ERK 1/2 permettrait d'accroître l'activation de mTORC1, d'où l'intérêt d'associer les deux voies de stimulation de

synthèse protéique. Cette hypothèse est validée par Miyazaki et al. [7] qui ont affirmés que l'engagement de mTORC1 vers une voie anabolique était corrélé à une co-activation par la voie MAPK.

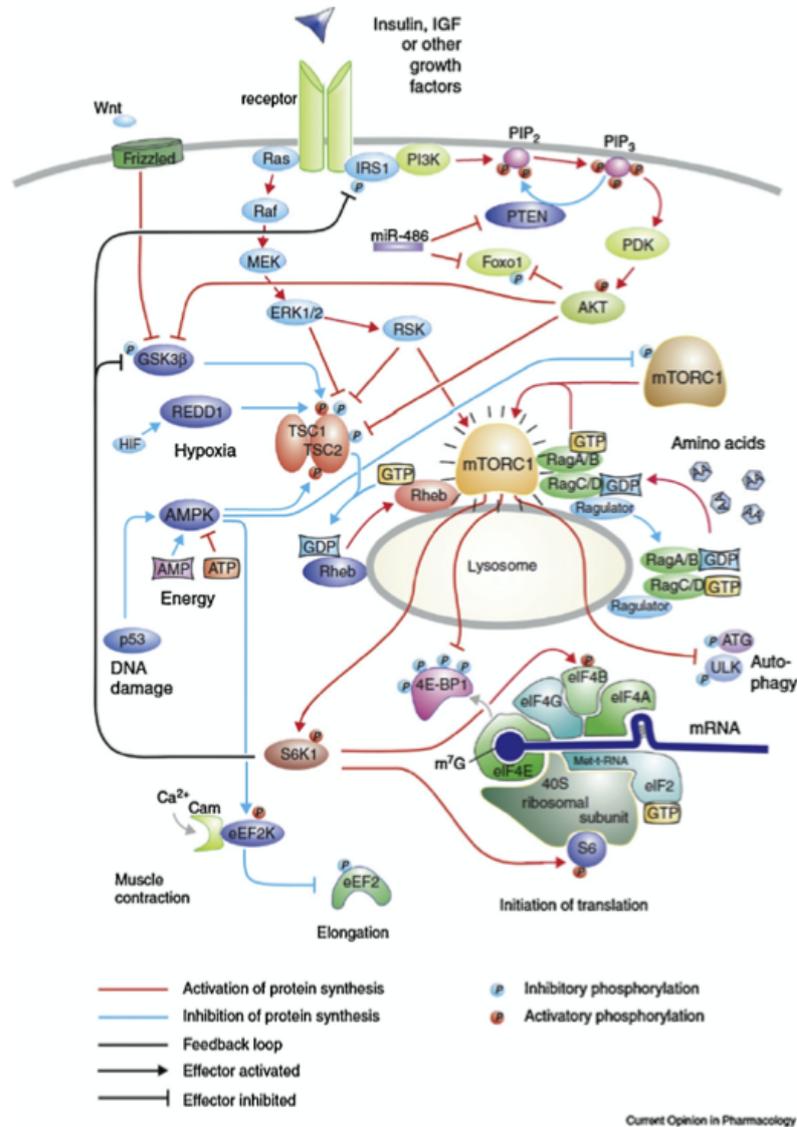


Fig. 1. Les voies de signalisation de la synthèse protéique musculaire. Carte simplifiée des voies de signalisation liées à mTORC1. Pour une description simplifiée, voir le texte, pour une description plus complète, voir la référence [8].

Fig. 3 : Schémas récapitulatif des voies impliqués dans la synthèse de protéines musculaires et dans les moyens permettant son inhibition

Source : Drummond MJ, Fry CS, Glynn EL, Dreyer HC, Dhanani S, Timmerman KL, Volpi E & Rasmussen BB. (2009). Rapamycin administration in humans blocks the contraction-induced increase in skeletal muscle protein synthesis. *J Physiol* 587, 1535-1546.

La **figure 3** est la synthèse des mécanismes précédemment énoncés.

- Facteurs favorisants

Pour qu'il y ait synthèse de protéines musculaires, il faut à la fois une élévation de l'insuline mais également une concentration plasmatique suffisante en acides aminés libres notamment en leucine. Ce pool d'acides aminés sera apporté, entre autres, par la prise

alimentaire et plus il sera important, plus la synthèse des protéines musculaires augmentera. Le fractionnement des repas, soit un maintien d'apport d'acides aminés à un niveau constant, permettra d'optimiser cette synthèse. La vitesse de cette synthèse augmente si le sujet pratique une activité sportive et dans le cadre d'une pratique de musculation, il y aura renouvellement accru des protéines musculaires [8].

- Activation de synthèse protéique par élévation du taux d'insuline

Une première solution pour activer cette synthèse serait *via* une élévation du taux d'insuline suite à un repas. En effet, en 1982 Kasuga et al. [9] ont mené une étude à ce sujet et ont affirmé que l'insuline pouvait activer l'activité intrinsèque de la protéine kinase B (Akt), entraînant alors sa phosphorylation. En effet, l'insuline permet la phosphorylation de la protéine IRS-1 (Insulin receptor substrate 1). Cette hypothèse a été validée en 2001 par Bodine et al. [14]. La phosphorylation de l'IRS-1 entraîne alors son association à la PI3K (phosphatidylinositol 3-kinase) laquelle va activer la PKB (sérine/thréonine protéine kinase B ou Akt) qui, via Rheb, va activer directement (Rheb-GDP) ou indirectement (Rheb-GTP) mTORC1. La voie indirecte est celle impliquant le complexe TSC1-TSC2 (Complexes de Sclérose Tubéreuse 1 et 2). Ce complexe va maintenir mTORC1 en un état inactif mais peut être lui-même désactivé via une phosphorylation de TSC2 par la PKB (dissociation du complexe). La TSC2 est une protéine GAP, autrement dit, elle va activer la GTP-ase et contribuer à hydrolyser la forme GTP de Rheb ce qui va empêcher l'activation de mTORC1 via cette voie (cf. Fig. : Mécanisme d'action de la synthèse protéique via une activation par de l'insuline et des acides aminés).

Au niveau du complexe mTORC1, une phosphorylation de 4E-PBP est nécessaire pour que ce dernier lève son inhibition sur eIF4E (facteur d'initiation de la traduction). Un complexe eIF4E-eIF4F-eIF4G-eIF4A se forme alors permettant l'initiation de la traduction. L'activation de la p70s6k va permettre l'élongation car il module l'expression de eEF2 (facteur d'élongation eucaryote 2) (**Figure 4**).

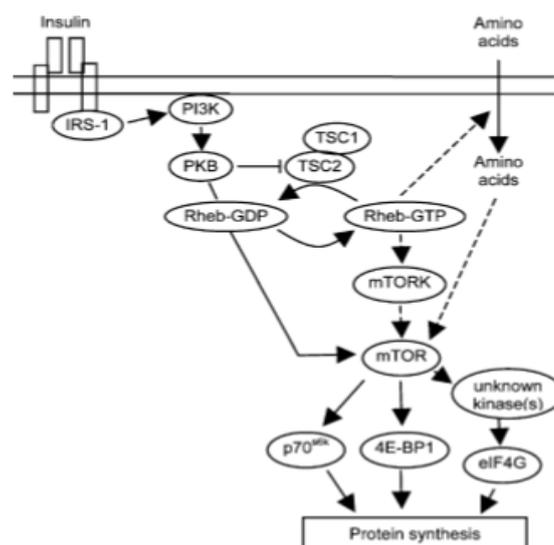


Fig. 4 : Mécanisme d'action de la synthèse protéique via une activation par de l'insuline et des acides aminés

Source : Deldicque L, Theisen D, Francaux M. Regulation of mTOR by amino acids and resistance exercise in skeletal muscle. Eur J Appl Physiol. 2005;94(1-2):1-10. doi:10.1007/s00421-004-1255-6

- **Activation de synthèse protéique par un apport conséquent en acides aminés (AA)**

Selon Brown et Proud [9] (2022), 4 ATP sont utilisés pour l'ajout d'un seul AA à la chaîne peptidique au cours de l'élongation de la traduction. C'est donc un processus énergivore, d'où la fatigue ressentie après l'entraînement. Ainsi, un apport en AA en pré et post-entraînement, via une alimentation riche en protéines constitue une bonne optimisation alimentaire. Une quantité insuffisante d'AA au cours de cette période entraînerait, a contrario, une mise au repos du processus anabolique (car trop coûteux en énergie) et donc une synthèse insuffisante de protéines musculaires et un frein à l'hypertrophie.

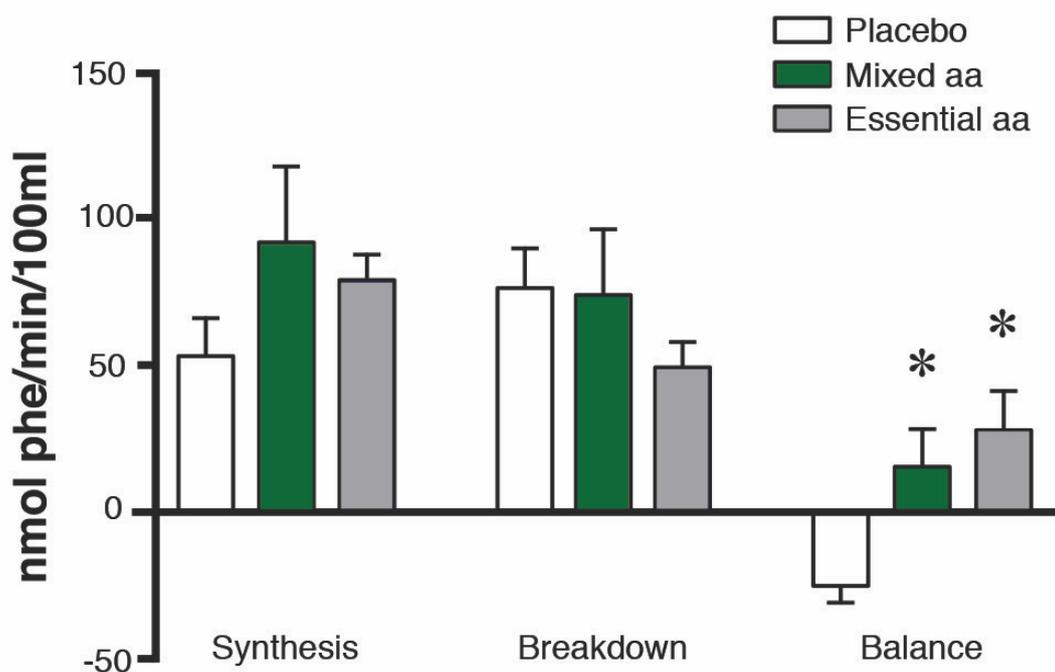


Fig. 5 : Apport en acides aminés et impact sur la synthèse protéique.

Synthèse, catabolisme et différences entre les deux mécanismes suite à l'ingestion d'un placebo, d'une boisson contenant uniquement des acides aminés essentiels et d'une boisson contenant un mélange d'acides aminés. L'axe des y est une mesure du taux de synthèse ou de dégradation des protéines, et de l'équilibre qui en résulte.

Source: Tipton KD, Gurkin BE, Matin S & Wolfe RR. (1999). Nonessential amino acids are not necessary to stimulate net muscle protein synthesis in healthy volunteers. *J Nutr Biochem* 10, 89-95.

Comme nous pouvons le voir sur la **figure 5** basé sur l'étude de Tipton et al. en 1999 [4], une absence d'apports en AA en post-entraînement (=placebo) produit une balance négative sur la synthèse de protéines musculaires : le catabolisme est prépondérant vis-à-vis de l'anabolisme. A contrario, lorsque le sujet a un apport en acides aminés en post-entraînement (que ce soit des AA mixtes ou bien les AA essentiels), la balance protéique est positive : il y a plus de synthèse que de dégradation. Cela est dû à l'activation de la voie de la mTORC1 grâce à l'apport en acides aminés (*cf. fig 3*). Parmi les AA à privilégier pour cette synthèse, nous avons notamment la Leucine car elle permet de favoriser l'assemblage d'eIF4F et la phosphorylation de la p70s6k [9] et lie directement la Sestrine2 [19] un régulateur négatif du complexe mTORC1. En l'absence de leucine, la Sestrine2 lie et bloque le GATOR2 qui est un régulateur positif du mTORC1. Lorsque la leucine est présente, elle bloque l'action de la

Sestrine2 permettant alors au GATOR2 d'exercer son action sur mTORC1 : la synthèse protéique peut donc commencer.

En second lieu on privilégiera également un apport suffisant en Isoleucine et en Valine qui sont aussi des acides aminés branchés protéinogènes. Ce trio est regroupé dans les compléments alimentaires sous l'appellation BCAA (Branched-chain Amino Acid). Ils font aussi partie des acides aminés essentiels, c'est à dire, des acides aminés qui doivent être apportés par l'alimentation et que le corps ne peut pas synthétiser seul. Cet apport pourra se faire dès l'entraînement et se poursuivre juste après (*cf. partie III*).

Nous pouvons d'ailleurs voir sur la *fig. 4* qu'un apport en acides aminés essentiels va provoquer une synthèse musculaire supérieure à celle faisant suite à un apport en un mélange d'acides aminés (qui contiendra, à même dose, moins d'acides aminés essentiels mais un large panel d'acides aminés différents).

Par ailleurs, une étude réalisée chez les rats (Inoue K. et al. 1994) [15] a aussi démontré qu'une alimentation riche en protéines permettrait d'accroître la force musculaire durant l'entraînement de résistance.

Le moment de cette prise alimentaire va aussi avoir un impact. La consommation de protéines dans les 1 à 4h post exercice de force permet d'accroître la synthèse musculaire. Cette synthèse peut rester active dans les 24h à 48h qui suivent l'entraînement de musculation [10]. Dans l'étude réalisée par Inoue K. et al. 1994 [15], il a été démontré que la consommation de glucides (comme nous l'avons vu précédemment avec l'insuline), protéines et de L-carnitine autour de l'entraînement permettrait d'accroître la synthèse de protéines musculaires. Il est donc important d'optimiser la nutrition et le moment de la prise alimentaire pour apporter au corps tous les éléments dont il a besoin pour décupler cette synthèse protéique (*cf. partie II*).

- **Activation de la synthèse par un apport en lipides**

Jacobs et al. [3] ont démontré que les lipides jouent également un rôle dans l'hypertrophie. En effet, il a été démontré que l'acide phosphatidique active directement mTORC1 suite à un signal mécanique que peut être un entraînement de force. You et al. (2014) [3] ajoutent quant à eux que cet acide phosphatidique résulte de la phosphorylation du DAG (Diacylglycérol) par la DGKz (Diacylglycérol kinase z), eux même issus des triglycérides. Cette théorie est ensuite validée par Mobley et al. [3] en 2015. Joy et al. [3] ont mis en place un essai clinique avec une supplémentation en acide phosphatidique sur un groupe de jeunes personnes entraînées et les résultats préliminaires semblent montrer que cette supplémentation produit une hypertrophie musculaire plus importante que sous placebo.

- **Activation de synthèse protéique via l'entraînement**

Avoir une alimentation équilibrée est important pour la balance protéique mais pour le gain de masse musculaire, il est crucial d'avoir une activité physique augmentée et adaptée. Burd et coll. [10] ont cherché les effets d'une ingestion de protéines 24h après l'exercice de force sur la synthèse musculaire ainsi que l'impact de l'entraînement. Il apparaît que suite à des séries d'exercice réalisées jusqu'à l'échec (à 90RM ou 30RM, la RM étant la charge maximale que peut soulever un individu pour un exercice donné en une seule répétition.), une alimentation appropriée jusqu'à 24h post exercice permettait d'augmenter le taux de synthèse protéique myofibrillaire comparativement à une alimentation convenablement dosée en protéines mais qui n'est pas associée à la pratique d'un exercice de force. La synthèse protéique sarcoplasmiques et mixtes n'ont par contre pas été affectés par la pratique ou non de cet exercice. Ainsi, en plus de l'importance de l'alimentation en phase de récupération (soit dans

les 1 à 4h post exercice) il est aussi important d'optimiser son assiette jusqu'à 24h post exercice. Au-delà d'une fenêtre alimentaire optimale, nous pouvons voir ici que l'exercice reste un point crucial dans un objectif d'hypertrophie.

D'ailleurs, l'étude de Baar K & Esser K (1999) [10] démontre qu'un entraînement régulier augmente le taux de phosphorylation de la p70S6k qui engendre par la suite une augmentation de la masse musculaire sur le long terme. Cette synthèse de muscle squelettique est d'autant plus importante que la charge appliquée est élevée chez le sujet.

D'autre part, l'étude réalisée chez des rats par Inoue K. et al. en 1994 [15] a démontré que la phosphorylation de la p70s6k1 n'avait pas lieu pendant ni juste après l'entraînement mais qu'elle avait lieu dans les 3h post entraînement et pouvait persister jusqu'à 36h après. Selon Hernandez et al. (2000) [10], cette phosphorylation serait la plus élevée dans une fenêtre optimale de 6h-24h post-exercice. Comme nous l'avons vu précédemment, cela permet de mettre en marche le complexe mTORC1 et donc la voie anabolique. Ainsi, la voie anabolique ne commence pas dès l'entraînement, bien qu'il y ait des périodes de repos d'1 à 2 minutes entre chaque série, mais bel et bien dans la période de récupération qui suit l'entraînement (de plus de 3h).

Néanmoins pour stimuler mTORC1 il faut un stimulus mécanique, apporté par la charge et l'intensité de l'exercice. Cette charge n'a pas besoin d'être maximale pour engendrer une activation du complexe enzymatique. Wackerhage et al. (2019) [11] ont démontré que seul 30% de la RM sont suffisants pour enclencher ce processus. L'intensité est en revanche un facteur important pour engendrer une hypertrophie des muscles squelettiques. Un entraînement est considéré comme intense lorsque l'individu va jusqu'à l'échec ou s'en rapproche fortement. Il peut soulever 30 à 100% de sa RM, la variable sera le nombre de répétitions réalisées. A titre d'exemple, si la série doit être faite sur 12 répétitions, il doit choisir la charge lui permettant de faire 10 répétitions difficiles mais faisables et les 2 restantes devraient lui paraître difficilement surmontables. S'il choisit en revanche des charges plus légères (sans toutefois être inférieur aux 30% de la RM recommandé), il doit effectuer la série jusqu'à l'échec, c'est-à-dire, jusqu'à ce qu'il ne puisse plus faire la moindre répétition supplémentaire [12].

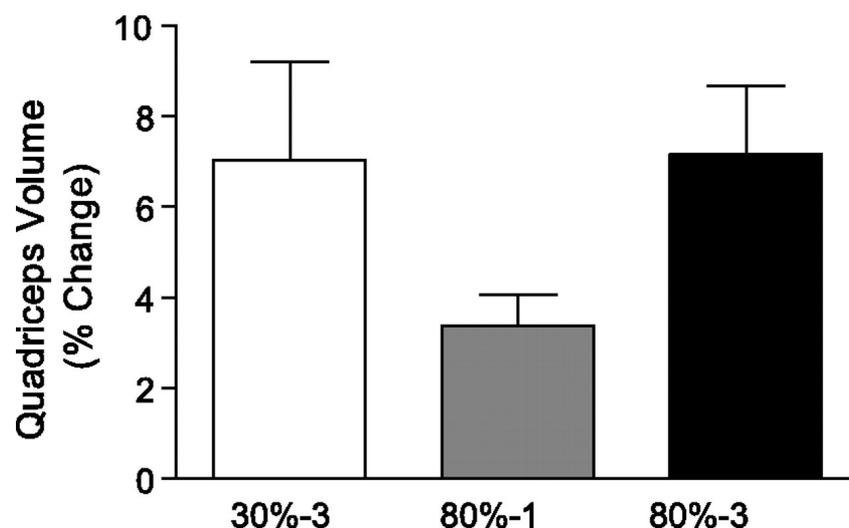


Fig. 6 : Variation en pourcentage du volume musculaire du quadriceps après 10 semaines d'entraînement en résistance. Les 3 groupes sont différents en intensité de contraction [% de la force maximale (1 répétition maximale)] ou en volume de contraction (1 ou 3 séries de répétitions) : 30%-3, 80%-1, et 80%-3.

Source : Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, West DW, Burd NA, Breen L, Baker SK & Phillips SM. (2012). Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. J Appl

Mitchell et coll. (2012) [12] ont aussi affirmé qu'une charge légère soulevée jusqu'à l'échec permettait une synthèse protéique similaire qu'une charge lourde soulevée jusqu'à l'échec. Le nombre de séries va aussi faire varier cette hypertrophie : elle sera plus grande pour 3 séries de 10 répétitions à 30% de la RM (charge légère) qu'une seule série à 80% de la RM (charge lourde) comme nous pouvons le voir dans la **figure 6**.

- **Influence hormonale dans l'hypertrophie**

La synthèse de protéines musculaires peut être aidée par le biais de l'alimentation d'une part mais aussi par le biais de certaines hormones. Les hormones ayant un impact prépondérant sur cette synthèse sont : l'insuline (vu précédemment), la testostérone et l'hormone de croissance GH. Bien que cette thèse évoque l'aspect crucial d'une alimentation adaptée pour l'hypertrophie, il ne faut pas négliger que la constitution même de l'individu, sa génétique ainsi que son métabolisme hormonal sont des facteurs à prendre en compte : chaque individu peut alors évoluer différemment pour une même alimentation et méthode d'entraînement.

TESTOSTERONE

La première hormone à aborder est la testostérone. Celle-ci est produite en majeure partie chez l'homme via les cellules de Leydig dans les testicules sous le contrôle de l'axe hypothalamo-hypophysaire. Chez la femme, une production mineure a lieu au niveau des ovaires. Enfin, il existe d'autres lieux de synthèse tels que la zone réticulée du cortex surrénal et les muscles squelettiques. Sa mise en circulation se fait via la globuline ce qui permettra sa mobilisation par certains tissus. Il est à noter que même si le taux de testostérone global est plus élevé chez l'homme que chez la femme, la concentration de testostérone mobilisée dans les muscles squelettiques est quant à elle similaire au sein des deux sexes [13].

La testostérone est une hormone cruciale chez un sportif de force qui souhaite gagner en masse musculaire puisque cette dernière a une activité anabolisante et anti-catabolique. Elle permet entre autres une synthèse de protéines musculaires via l'activation de mTORC1 mais aussi une amélioration des performances (gain de force, de puissance et d'endurance). Cette hormone a aussi un rôle à jouer sur les glucides : elle permet de transporter le glucose car elle entraîne une augmentation de l'expression de GLUT4 (un transporteur du glucose), élève la signalisation de l'insuline en augmentant les substrats des récepteurs insuliniques IRS1 et IRS2 (substrats 1 et 2) et provoque un accroissement du taux de glycogène intramusculaire par stimulation de la glycogène synthase. Or comme nous l'avons vu précédemment, une élévation du taux d'insuline permet aussi une synthèse protéique. Kraemer et al. (2017) [13] ont également affirmé le rôle de la testostérone dans "la synthèse des protéines, [la modification] des types de fibres, [l'augmentation du] transport du lactate par une régulation à la hausse de l'expression des protéines du transporteur de monocarboxylate 1 (MCT1) et 4 (MCT4) et [une augmentation de] l'activation, la prolifération, la mobilisation, la différenciation et l'incorporation des cellules satellites dans le muscle squelettique de souris".

L'étude réalisée sur des rats par Inoue K. et al. en 1994 [13] a aussi démontré l'action de la testostérone sur l'hypertrophie. Il apparaît que sous oxandolone (antagoniste androgénique), l'hypertrophie est atténuée de 70% par rapport à un groupe témoin. La testostérone a donc bien une incidence sur l'hypertrophie.

Cette hormone permet également d'augmenter le taux d'hormones de croissances GH, dont on verra les effets ci-après.

HORMONE DE CROISSANCE GH

Les hormones de croissance (ou GH = Growth Hormones) sont contenues dans les cellules somatotropes de l'antéhypophyse et sont anabolisantes. Il y a la bGH ou *bioactive Growth Hormone* ainsi que l'iGH ou *immunoreactive Growth Hormone*, qui est celle dont on va s'intéresser ici. L'iGH est sécrétée dans le sang en réponse à l'exercice. Rubin et al. [13] ont démontré que les taux d'iGH et d'IGF-1 pendant la période de pic d'activité étaient plus élevés chez les personnes entraînées que chez les personnes pratiquant peu de musculation.

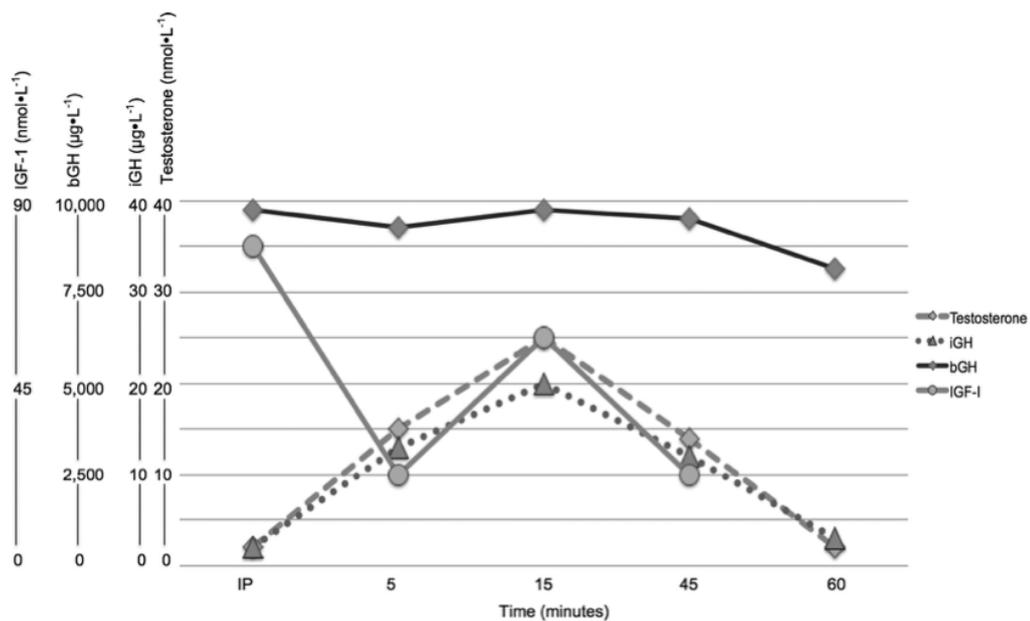


Fig. 7 : Réponse plasmatique à l'état de jeûne de la testostérone, de l'hormone de croissance bioactive (bGH), de l'hormone de croissance immunoréactive (iGH) et du facteur de croissance analogue à l'insuline 1 (IGF-1) immédiatement après l'arrêt de l'exercice de résistance.

Source : Kraemer WJ, Ratamess NA, Nindl BC. Recovery responses of testosterone, growth hormone, and IGF-1 after resistance exercise. Journal of Applied Physiology. 2017;122(3):549-558. doi:10.1152/jappphysiol.00599.2016

La **figure 7** montre la fluctuation hormonale que subit notre organisme au cours de la période dite de repos. La bGH reste globalement stable et élevée pendant la période de récupération. En revanche, suite à l'entraînement, la testostérone et l'iGH augmentent dans les 15 à 30 premières minutes, avant de revenir à des concentrations plus basses similaires à celles de repos dans l'heure qui suit l'arrêt de l'exercice. Lors de l'entraînement, particulièrement pendant les périodes de récupération entre deux séries, ce pic de sécrétion sert à minimiser le catabolisme et soutenir le sportif au cours de son exercice en lui procurant la force nécessaire pour soulever les charges.

L'IGF-1 ou FACTEUR DE CROISSANCE ANALOGUE A L'INSULINE 1

De nombreuses études ont été réalisées sur les capacités anabolique de l'IGF1 lors d'un exercice de force. La plupart d'entre elles sont contradictoires, ce qui ne permet pas de conclure sur son réel effet.

Il est par ailleurs établi que l'IGF1 est une hormone de croissance anabolisante issue du foie dans la grande majorité mais peut aussi être produite par les cellules. Elle sera sécrétée dans la circulation sanguine en réponse à un stimulus tel que l'étirement de la fibre musculaire lors d'un exercice de musculation ou bien *via* une stimulation par la GH qui, nous l'avons vu précédemment, est également sollicitée lors de ce même type d'exercice. Ces deux composés agissent en synergie en faveur de l'hypertrophie. Les IGF1 sont transportées par les IGF1BP (IGF Binding Protein) qui vont contrôler leur demi-vie et leur biodisponibilité. Une fois sécrétées, ces hormones vont permettre d'activer la prolifération et la différenciation des cellules satellites en myoblastes (effet anabolisant permettant l'initiation du cycle cellulaire et donc une augmentation du nombre de fibre musculaire). Ces affirmations ont été établies par Doessing et al. (2010) [13] et confirmés par Heinemeier et al. en 2012 [15] dans des modèles murins puisque chez l'homme cela ne semble pas être possible. Singh et al. (1999) [15] ont été les premiers à émettre l'idée selon laquelle l'IGF1 sécrété suite à l'entraînement serait une aide à l'augmentation de la force musculaire. En plus de stimuler la synthèse protéique, l'IGF1 favorise l'utilisation des acides gras libres et améliore la sensibilité à l'insuline [14]. En effet, Bajer et al. (2015) ont démontré dans leur étude que l'IGF1 est un déterminant puissant de perte de masse grasse associé à la pratique d'un exercice.

L'IGF1 permet également de réguler la voie impliquant Akt (protéine kinase B). En effet, l'Akt peut être activé par l'IGF1 qui, suite à cette activation, va inhiber FoxO (phosphorylation inactivatrice) et, en conséquence, va freiner la voie de dégradation des protéines musculaires (Biggs et al. 1999 [14]). L'IGF1 aurait donc un effet pro-anabolisant et inhiberait, dans un même temps, le catabolisme musculaire.

Néanmoins en 2011 Nindl et al. [13] ont effectué une étude chez 846 soldats bien portant finlandais afin de déterminer l'impact de l'IGF1 circulant lors de pratiques sportives diverses (endurance, force). Il apparaît ainsi que suite à un exercice de résistance, le lien entre augmentation d'IGF1 circulant et augmentation de la force et de la masse maigre est difficile à établir, ne permettant alors pas de conclure sur la réelle pertinence de l'IGF1 en tant que facteur permettant le gain de masse musculaire..

- Réparation tissulaire et gain de masse musculaire

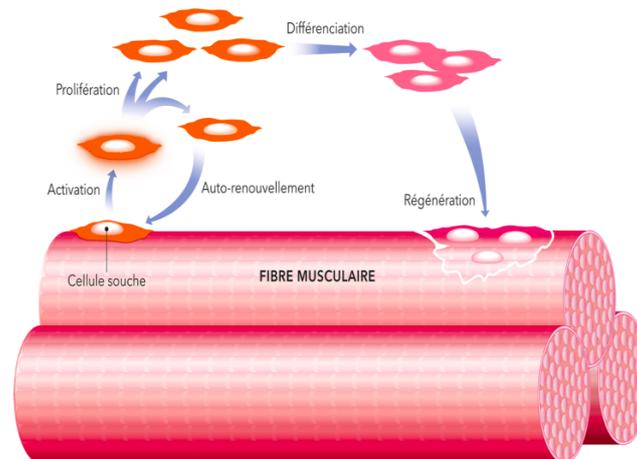


Fig. 8 : La réparation des fibres musculaires

Un entraînement de force va provoquer un étirement des fibres musculaires, il est donc nécessaire pour l'organisme de mettre en place une réparation tissulaire pour amenuiser les dégâts causés au cours de la séance (**figure 8**). Plus cette réparation sera importante, plus le gain de masse musculaire sera élevé chez le rongeur. Chez l'Homme ce système de réparation a pour but de maintenir l'homéostasie du muscle.

Sous la lame basale, résident des cellules souches musculaires appelées cellules satellites. Ces cellules souches peuvent être activées vont proliférer et entrer en différenciation à la suite d'une lésion provoquée au niveau des fibres musculaires en vue de la réparer. *In fine*, le nombre de cellules différenciées, appelées myotubes, pourra augmenter. C'est ainsi que la régénération cellulaire suite à un exercice de force a lieu (Dumont et al. 2015) [3]. Par ailleurs, de nombreux éléments de preuve indiquent que l'exercice de résistance (surtout en pratique régulière) augmente la prévalence des cellules satellites musculaires chez les humains (Dreyer et al. 2006 ; Mackey et Ro-Binovitch 2006 ; Petrella et al. 2008 ; Verdijk et al. 2009 ; Snijders et al. 2014, 2016 ; Nederveen et al. 2015 [3]). Philips et al. (1997) [9] ont quant à eux démontré que la synthèse protéique en faveur de la régénération musculaire a lieu jusqu'à 48h post-entraînement. Kraemer WJ et al. (2017) [13] affirment que : pour qu'il y ait dégradation et re-synthèse, il faut que le stimulus d'exercice dépasse le seuil d'adaptation de l'individu. Ainsi, un sportif entraîné a tout intérêt à changer ses méthodes d'entraînement au cours du temps (soit par augmentation de charges, soit par augmentation de répétitions ou de méthode de travail) pour pouvoir surpasser ce seuil et enclencher la synthèse de protéines musculaires.

Ainsi, lors d'un exercice de musculation, l'association charges - contraction musculaire - effort intense va provoquer des microlésions au niveau des fibres musculaires. En réponse, le système immunitaire va être activé afin d'éliminer ces déchets puis il va des médiateurs inflammatoires qui vont activer les cellules satellites quiescentes.. En parallèle, les hormones anabolisantes (testostérone, IGF1 et GH) soutiendront la synthèse protéique. Néanmoins, si cet anabolisme musculaire est effectif en post exercice, il en demeure que lors de la séance de musculation, c'est le catabolisme musculaire qui prime.

d) Catabolisme musculaire

4 voies sont concernées dans la protéolyse :

- **Le système Ubiquitine-Protéasome (UPS)** : permet le catabolisme des protéines myofibrillaires. Les protéines à éliminer sont marquées par la fixation d'une chaîne de poly-ubiquitine (généralement 4 résidus ubiquitine) et sont perçus comme un message pour enclencher la dégradation de la protéine en question.
- **La voie des calpaïnes** : ce sont des protéases activées par le calcium qui vont permettre de dégrader les protéines en présence de calcium.
- **La voie lysosomale** : dégradation des protéines à demi-vie longue, les protéines membranaires et les organelles par le biais des cathepsines.
- **La voie apoptotique** qui fait intervenir les caspases et entraîne la mort cellulaire.

Une fission mitochondriale, telle qu'elle est provoquée lors d'un exercice de force, est un stimulus qui va permettre à l'AMPK de phosphoryler FoxO3 (Forkhead box O3) qui est un facteur de transcription. Ce dernier va permettre la synthèse de MuRF1 (Muscle Ring Finger 1) qui est une enzyme protéolytique ainsi que de MAFbx (Muscle Atrophy F box) ou Atrogin-1 qui va bloquer la synthèse protéique. FoxO3 va aussi intervenir dans la synthèse de gènes liés à l'autophagie. Ainsi, une activation de la protéolyse *via* la voie UPS entraîne bien souvent une protéolyse *via* la voie lysosomale, dépendamment du type d'exercice effectué et de l'état d'entraînement du sujet (Russel 2010) [15]. Il existe aussi un catabolisme musculaire induit par une forte inflammation (TNF α et IL1 β élevées) ainsi que par les glucocorticoïdes (*via* un stress important ou un traitement médicamenteux) (**Figure 9**).

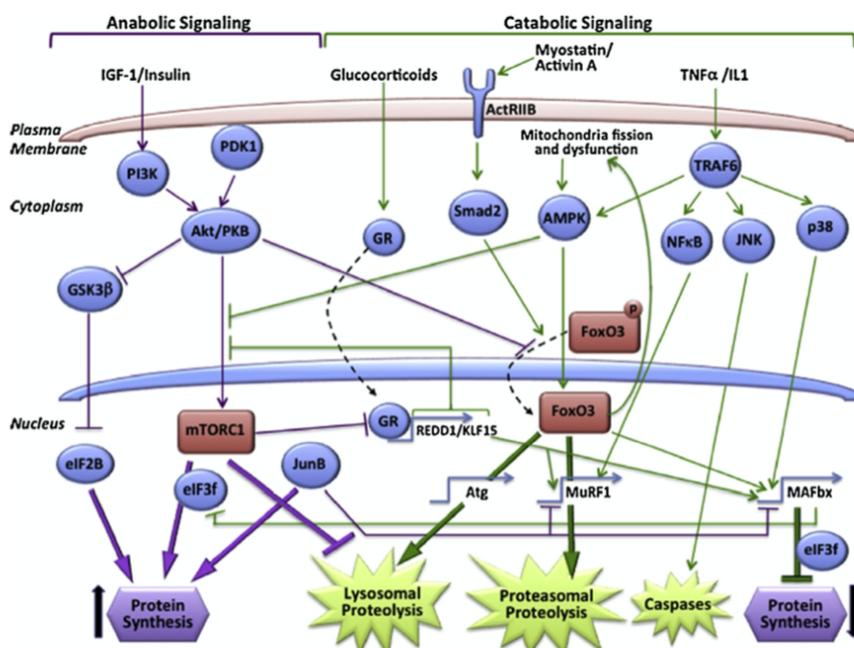


Fig. 9 : Les voies de signalisation de la protéolyse musculaire relation avec la synthèse protéique.

Source : Mosoni L. Le métabolisme protéique musculaire, contrôle nutritionnel. Nutrition Clinique et Métabolisme. 2014;28(1):29-37. doi:10.1016/j.nupar.2013.12.003

La construction musculaire résulte alors d'une régulation fine des processus de synthèse et de dégradation protéiques avec une phase anabolisante où la protéosynthèse est majeure par rapport à la protéolyse et la phase catabolique où les proportions sont inversées. Lors de l'exercice de force, mTORC1 est inhibée par l'AMPK ce qui a pour effet de limiter la synthèse de protéines musculaires en intra-training. En effet, cette kinase cherche constamment à conserver un niveau d'ATP intracellulaire constant. Or, comme nous l'avons vu précédemment, la voie anabolique via mTORC1 est très énergivore, c'est la raison pour laquelle l'AMPK va chercher à amenuiser son activité [9]. Pour que mTORC1 soit activé, il faut une forte diminution d'ATP, alors que pour l'activation de l'AMPK une faible quantité d'AMP suffit à enclencher le processus. Il en résulte que lors d'un entraînement intense, l'AMPK devrait être autant activé que mTORC1 mais puisque l'AMPK bloque l'activation de mTORC1 au cours de l'exercice, il en résulte un effet catabolisant plus intense que l'effet anabolisant. En période de repos, l'inhibition par l'AMPK n'est plus présente, permettant alors l'effet anabolisant de mTORC1 [9].

Pour favoriser l'hypertrophie musculaire, il est important d'avoir un entraînement suffisamment conséquent mais il ne faut pas négliger l'alimentation non plus, véritable "carburant" de notre organisme. L'entraînement est certes un facteur à ne pas négliger, mais s'il n'est pas supporté par une alimentation adéquate, l'hypertrophie qui en résulte n'en sera que minimisée. Ainsi, il est important d'avoir une alimentation adaptée à son effort, afin d'avoir les nutriments essentiels à une prise de masse musculaire [16, 17, 18].

Partie 2 : Plan alimentaire du sportif de force

Les macronutriments désignent les protéines, les glucides et les lipides. La consommation de chacun d'entre eux est nécessaire afin de conserver une alimentation dite "équilibrée". La régulation fine de leur proportion dans l'assiette du sportif va permettre d'optimiser la prise de masse musculaire. Il est donc nécessaire de définir la quantité à consommer et de comprendre les raisons pour lesquelles ils sont importants dans le cadre d'une recherche d'hypertrophie musculaire.

a) Les protéines, un macronutriment clé au service de la synthèse de protéines musculaires

- Rôle des protéines et recommandations nutritionnelles

Parmi les macronutriments, ceux qui détiennent un rôle clé dans la synthèse de protéines musculaires sont les protéines et pour cause, après l'eau, les protéines sont les constituants les plus abondants des fibres musculaires. Une fois digérées, elles donnent lieu à une multitude d'acides aminés (AA) qui sont transportés des entérocytes à la circulation sanguine via la veine portale hépatique. Une partie sera réquisitionnée par le foie et l'autre sera mise à disposition dans la circulation sanguine pour être distribuée dans les tissus [20].



Pour un individu lambda ne pratiquant pas d'activité sportive, l'apport nutritionnel recommandé est de 0.8 g/kg/jour mais pour un individu qui s'entraîne et qui est soucieux d'optimiser ses apports nutritionnels en vue d'accroître ses performances sportives, une consommation minimale de **1,6 g/kg/jour** est plus approprié [21]. En effet, la méta analyse de Morton et al. (2018) [22] met en exergue les effets d'un apport protéique suffisant sur la force et le gain de masse musculaire chez un sujet sain pratiquant de la musculation. Sur les 1863 participants, il apparaît qu'associé à la pratique de musculation, un gain de masse musculaire ainsi qu'un gain de force (évalué suite à du 1RM) a été observé, à des degrés variables selon l'individu et son état d'entraînement, avec une consommation minimale d'1,6 g de protéine / kg / jour. Ainsi, si le sujet fait 4 repas, une consommation de **0,4g de protéines/kg/repas** est recommandé. *NB: lorsque le sujet cherche à amenuiser son taux de masse grasse (en adoptant un régime de "sèche"), cet apport doit être plus élevé pour limiter le catabolisme musculaire du fait d'un régime bas en termes de calories.* Dans le cadre d'un sportif qui tente d'augmenter ses calories quotidiennes (soit en "prise de masse" comme ici), il est préconisé de fractionner les prises alimentaires : une ou des collations seront à prévoir afin d'atteindre plus facilement le seuil en macronutriments exigé et d'avoir une diffusion homogène tout au long de la journée. De nombreuses recherches montrent qu'une consommation par repas de protéines > 0,4g/kg entraîne une plus grande oxydation des AA mais ce n'est pas le cas pour la totalité des AA

ingérés car certains sont réquisitionnés pour la réparation tissulaire qui suit un entraînement de force [23]. Globalement, cela consiste en un apport de **20 à 40 g de protéines par repas** [24].

L'augmentation de la synthèse protéique ne pourra être optimale que si l'apport en AA (surtout ceux qui sont essentiels) *via* l'alimentation est suffisant. Il existe 20 AA au total, dont 9 sont des AAE (acides aminés essentiels). Ces AA sont dits essentiels car on ne peut les retrouver que *via* l'alimentation. A l'inverse, les AA non essentiels sont ceux qui sont synthétisables par l'organisme. Certains sont aussi qualifiés comme étant des AA "semi-essentiels" dans la mesure où leur synthèse par notre organisme est limitée dans le temps et ne peut parfois pas compenser les pertes en AA générés par l'exercice de force. Selon Pitkanen et al. (2002) [25], une séance de musculation provoque une perte totale en AA de 14%, dont une diminution du niveau des AAE de 20% et de 12% pour les AA non essentiels.

On peut classer les AA en deux catégories [9] :

- Certains, comme le glutamate, vont créer un **gonflement de la cellule par osmolarité intracellulaire** suite au transport de Na⁺ induit par le passage des AA à travers la membrane. Cet effet va induire une synthèse protéique mais aussi une synthèse de glycogène (*cf. partie II-b*) et de lipides.
- La deuxième catégorie concerne les acides aminés ramifiés comme la leucine. Cet AA est important à considérer dans le cadre d'une hypertrophie car c'est jusqu'à présent le seul capable d'induire directement une synthèse de protéines musculaires en phosphorylant la p70s6k.

Les AAE sont les AA à prendre en compte en cas de supplémentation chez un sportif qui souhaite prendre en muscle. En effet, un apport en 6g d'AAE permet une synthèse protéique supérieure à un apport en 6g d'un mélange d'AA divers (3g d'AAE + 3g d'AA non essentiels) [26]. Il a été rapporté qu'une quantité de **10g d'AAE/jour** serait optimal pour une recherche d'hypertrophie [27]. Cette valeur peut toutefois différer en fonction du poids et de l'entraînement du sujet. Parmi eux, ceux qui ont un impact certain sur la synthèse protéique sont les acides aminés branchés à chaîne ramifiée (ou BCAA) comprenant : la Valine, la Leucine et l'Isoleucine. Ils ont un rôle dans le métabolisme des protéines, sur la fonction neuronale et sur la régulation glycémique par action sur l'insuline. La leucine permet notamment d'augmenter le statut énergétique de la fibre musculaire ce qui permet de prolonger la synthèse des protéines [28]. Pris ensemble, elles agissent en synergie pour limiter le catabolisme puisque la valine et la leucine empêchent l'élimination précoce de la leucine. Un apport de **2g de leucine** (stimulus de synthèse) toutes les 3 à 5h en période de repos et de **3,5g en post-training** est préconisé pour booster la synthèse protéique. Néanmoins, la prise des autres AAE importe tout autant [29].

- A quel moment ?

Les quantités journalières de protéines à consommer sont alors établies, mais à quel moment faut-il les intégrer afin d'optimiser la prise de masse musculaire ?

Andersen et al. [30] ont mené une étude qui compare sur une période de 14 jours avec le même mode d'entraînement :

- Un groupe de sportifs consommant 25 g d'un mélange de protéines (whey, caséine, oeufs, ...) avant et après un entraînement de force
- De la maltodextrine (glucide) seul avant et après un entraînement de force

Au terme de ces 14 jours, une augmentation significative de la taille des fibres musculaires de type I et de type II a été observée dans le groupe ayant consommé les 25g de protéines pré et post-entraînement.

→ Ils ont alors annoncé que les apports protéiques journaliers étaient à maximiser en période pré et post entraînement, et ce, dans un délai minimal par rapport à l'effort physique.

Néanmoins, lorsque Schoenfeld et al. [31] ont tenté de réaliser une étude longitudinale pour prouver si effectivement un bolus important de protéines juste avant et juste après l'entraînement permettrait effectivement d'optimiser cette synthèse protéique, ils se sont heurtés à la conclusion inverse : aucune différence significative a été observé par rapport au gain de force et de masse musculaire comparativement à un apport protéique modéré mais bien diffus dans la journée.

→ Ils concluent que le moment de la prise de ces protéines importe peu si l'apport en fin de journée suit les recommandations.

Il faut tout de même noter que les sujets inclus dans cette étude d'un an ne réalisaient que 3 séances/semaine de "full body" (entraînement de résistance du corps entier). Il est donc possible que l'ingestion de protéines juste avant et juste après la séance ne soit réellement pertinente que pour les athlètes suivant un programme strict et régulier ou pour ceux ayant un plus gros volume d'entraînement.

Aussi, Schoenfeld et al. (2017) [21] ont démontré qu'il n'y avait pas de différence significative sur le gain de masse musculaire et de force lors d'une consommation en protéines juste après l'entraînement par rapport à une consommation de protéines 3h après ce même entraînement.

Ainsi, un sportif pourra se limiter qu'à la seule contrainte des 1,6 g/kg d'apport en protéines journalier à répartir tout au long des 24h qui suivent la séance pour optimiser la synthèse protéique (Fabre M, Hausswirth C, Tiollier E, et al. (2017), Naclerio F, Larumbe-Zabala E, Ashrafi N, et al. (2017) et Burd NA, Gorissen SH, et al. (2015)) [21]. La recommandation de consommer des protéines juste après l'entraînement, dans ce que l'on appelait la "fenêtre anabolique" (30 min. max. post-entraînement) est désormais désuète. Il est toutefois grandement recommandé d'avoir un apport en protéines dans un laps de temps pas trop éloigné vis à vis de la séance de musculation (dans l'heure qui suit), ainsi qu'un apport en eau et du repos, afin d'optimiser la récupération et le bon déroulement de la phase anabolique. [32] L'apport en protéines avant la séance peut parfois s'avérer utile mais il faut tenir compte du temps de digestibilité de chaque source afin de s'assurer qu'une libération en AA a bien lieu pendant la séance pour limiter au maximum le catabolisme. Il faudra aussi tenir compte du pic d'insuline engendré par cet apport, selon la source, pour éviter toute hypoglycémie pendant la séance qui nuirait à la performance (*cf. partie IIb*). L'apport au cours de la séance est par contre jugé peu pertinent car n'aurait pas de réel impact sur la synthèse musculaire et pourrait au contraire nuire à la performance du sportif, du fait de la diminution d'énergie engendrée par la digestion [33]. Les AA sous la forme de BCAA sont quant à eux à prendre préférentiellement au cours de l'entraînement afin de limiter le catabolisme.

Cependant, sans stimulus permettant l'activation de mTORC1 (*cf. partie I*) tel qu'un entraînement de type musculation, cet apport en protéine, aussi conséquent soit-il, ne permettrait pas un gain de masse musculaire conséquent. Dans cette même optique, il est à noter que plus un sujet sera entraîné, plus il aura un gain de force et de masse maigre supérieur, si l'apport en macronutriments suit, comparativement à un individu sédentaire (Morton et al. 2018) [21]. Aussi, un sujet âgé aura plus de mal à gagner en masse musculaire qu'une personne plus jeune. Ce phénomène est lié au "turnover" des protéines : Chez un sujet âgé, la synthèse protéique est insuffisante par rapport au taux de dégradation qui a lieu lors de l'entraînement.

Son turnover des protéines est dit négatif : il en résulte un gain de masse maigre inférieur à un sujet plus jeune où le turnover des protéines sera positif [34].

- Les sources de protéines : comment les choisir ?

La qualité des protéines est définie suivant leur capacité à stimuler la synthèse protéique et à engendrer une hypertrophie musculaire. De nombreuses sources de protéines existent :

- Oeufs
- Poisson et viandes
- Protéines végétales
- Protéines de lait (*qui sera développé dans la partie III*)

Les oeufs :



Excellente source de protéines, digestible et riche en AA (autant sur la diversité que la quantité).

Un gros œuf entier contient :

- 75 kcal
- 6 g de protéines
- 1,5 g de graisses saturés
- 0,5 g de leucine
- Des riboflavines (15% des AJR), du sélénium (17% des AJR), de la vitamine K (31% des AJR) et riche en Choline (bon pour la fonction cognitive).

- Contient entre autres de la lutéine (bon pour la vue) et des antioxydants à base de caroténoïdes (qui donne au jaune d'œuf sa couleur).
- Source d'oméga 3

Le blanc d'œuf a longtemps été adulé par les sportifs en période de "sèche" (perte de masse grasse) mais il est à noter que malgré son faible apport en calories du fait de son absence de matières grasses (16kcal pour 1 blanc d'œuf), son taux de protéines est aussi plus faible que pour un œuf entier (3,5 g de protéines par blanc d'œuf).

L'œuf a longtemps été décrié du fait de sa teneur en cholestérol mais de plus en plus d'études démontrent l'absence de relation entre la consommation d'œuf et les maladies coronariennes [29]. En somme, il constitue un allié de choix pour le sportif désireux de consommer davantage de protéines et un apport en oméga 3 (plus de détails sur les intérêts des oméga 3 en *partie IIc*).

Poissons et viandes

Les viandes :

- Sont riches en AAE : une portion de 115 g de bœuf maigre contient 10 g d'AAE (dont 3,5 g de leucine) et 30 g d'AA au total.

- Limitent la perte de masse maigre tout en stimulant la synthèse protéique du fait de l'apport en protéines et en AA conséquent
- Sont riches en fer, sélénium, vitamines A, B12 (seules les protéines animales en contiennent) et en acide folique
- Sont source de carnitine : c'est une molécule qui transporte les acides gras à longue chaîne dans les mitochondries pour l'oxydation, permet de préserver le glycogène musculaire et de diminuer le catabolisme intra-entraînement
- Source importante de créatine : soit 4-5 g / kg de poulet ou de bœuf. La créatine permet entre autres un gain de force et une meilleure récupération (*cf. partie III*).



Les poissons :

- Riches en AAE
- Certains sont riches en oméga 3 (thon, saumon, ...)
- Apport calorique bas pour la plupart
- Source de vitamine D (renforce l'immunité)



Les protéines végétales

Les protéines végétales sont présentes dans les légumineuses et les céréales : pois chiche, lentilles corail, soja, riz, avoine ... Au-delà de leur apport protéique, ils constituent également un apport en glucides, en minéraux, en fibres et en vitamines (*détails partie III*).



Comment choisir "la meilleure source de protéine" ?

Les protéines végétales diffèrent considérablement des protéines animales. Ainsi dans le choix des protéines végétales il faut tenir compte de plusieurs facteurs :

- La **teneur en leucine** de la protéine
- La **vitesse d'absorption** par l'organisme

En effet, à même quantités de protéines ingérées, la synthèse protéique sera plus ou moins activée en fonction de la teneur en leucine du bol alimentaire. Comme nous l'avons vu précédemment, un apport de 2g de leucine par repas est conseillé afin de mettre en marche (ou de maintenir) le

processus de synthèse protéique. Ainsi, la meilleure source de protéines sera celle qui fournira le plus de leucine et accessible le plus rapidement.

A titre d'exemple, voici un tableau comparant la teneur en leucine des produits précédemment cités ainsi que leur vitesse de digestion, par ordre décroissant :

Source de protéines	Teneur en leucine	Temps de digestion
Protéines lactières	10-14%	<u>Variable selon les produits :</u> Whey concentré et isolat : Rapide +++ Caséine : Lente <i>cf. partie III</i>
Œufs entiers	8,6%	Blancs d'œufs : rapide +++ Œufs entier : rapide
Viande	8%	Viande maigre (blanc de poulet, dinde, ...) : rapide + Viande rouge : lente
Protéines végétales	Variable selon la source, mais globalement 8% Soja (isolat) : 6,7% Protéine de riz : 8 % Protéine de pois : 9%	Variable selon la source : +/- rapide

Il apparaît alors que les protéines lactières et les œufs constituent des sources de protéines optimales mais il ne faut pas se limiter à ces seuls aliments. L'apport en micronutriments est aussi à considérer, tout comme l'apport calorique dans le cadre d'une hypertrophie, la teneur en matières grasses ... C'est la raison pour laquelle il est recommandé de suivre un régime varié.

- Protéines animales VS protéines végétales ?

L'étude de Cohorte d'Alexandrov, Eelderink, Singh-Povel et al. (2018). [35] évalue l'impact des différents types de sources protéiques vis-à-vis de l'hypertrophie. Même si cette étude suggère que l'apport en protéines totale aide à la construction musculaire associée à la pratique d'un exercice physique, le gain de masse musculaire apparaît supérieur chez les individus consommant des protéines animales (poisson, viande, œuf) par rapport à la consommation de protéines végétales.

Cette affirmation a d'ailleurs été confirmée avec l'Étude de Hartman et al. [36] au cours de laquelle les participants ont été amenés à consommer :

- Soit un mélange de saccharose + 30 g de protéines de lait,
- Soit un mélange de saccharose + 30 g de protéines de soja.

Au terme de 12 semaines de tests soumis à un même entraînement, il en ressort que le groupe qui a consommé les protéines de lait ont eu un gain de masse maigre et une perte de masse grasse supérieur au groupe ayant consommé les protéines de soja (lequel a eu des résultats identiques au groupe sans supplémentation particulière). Ces résultats s'expliquent notamment

par une quantité moindre en AEE (dont la leucine) dans les protéines végétales comparativement aux protéines de lait et par le fait que les protéines végétales sont dans des fibres qui nécessitent une plus longue digestion. De plus, Cederroth et al. [37] montrent que les phytoestrogènes contenus dans le soja inhibent le complexe MTORC1 via l'activation de l'AMPK (cf. partie I) diminuant d'autant plus la synthèse protéique.

NB : Du fait de ces phytoestrogènes, la protéine de soja sera à prendre préférentiellement chez les femmes sans problèmes hormonaux particuliers et à limiter chez les hommes.

En dehors de la protéine de soja, celle de riz constitue un apport intéressant en protéines pour les individus qui souhaiteraient se tourner vers un apport en protéines végétales car elle a une absorption moyenne à lente mais avec un pic en leucine plus rapide comparativement à la protéine de lait [38].

Cependant, Volek et al. [39] ont réalisé une étude sur 9 mois sur des sujets entraînés en comparant un apport en protéines de lactosérum, en protéines de soja, en protéines de pois et en protéines de riz. Il apparaît que, à même dose administrée, seule la protéine de lactosérum permettait une amélioration significative du gain de masse maigre, comparativement aux autres sources de protéines de l'étude. Cette différence de résultats s'explique par le fait que la protéine de lactosérum est plus riche en leucine que les autres protéines (végétales). Puisque la dose plateau en leucine n'a pas été atteinte dans chacun des groupes, c'est donc la dose en protéines permettant l'apport en leucine le plus élevé qui a permis un gain de muscle plus conséquent. De nombreuses autres recherches ont démontré que le taux et la diversité des AAE dans les protéines animales et laitières étaient supérieurs par rapport aux protéines végétales (pois chiche, soja, ...) [29].

Ainsi, il semble clair que l'apport en protéines de lait semble donner de meilleurs résultats, à même quantité ingérée, que les protéines végétales. Néanmoins, un sportif de force végétarien ne peut faire autrement que de consommer ces aliments en guise de sources de protéines. Afin de contrecarrer les effets moindres sur la synthèse musculaire des protéines végétales, il suffit d'augmenter la dose de protéine pour obtenir l'équivalent de 3,5g de leucine. Bien évidemment, il s'agit là d'un raccourci, car dans les faits la synthèse protéique ne se base pas uniquement sur la teneur en leucine / dose de protéine ingérée.

Au niveau de la conversion, elle peut se faire comme suit :

Après un entraînement de force, il est préconisé de consommer 3,5g de leucine afin de soutenir la synthèse protéique.

Dans le cas d'une protéine de pois, la teneur en leucine est de 9%.

$$\begin{aligned} & 100 \text{ g de protéine de pois} \rightarrow 9 \text{ g de leucine} \\ & \dots\dots \text{ g de protéine de soja} \rightarrow 3,5 \text{ g de leucine} \\ & (3,5 \times 100) / 9 \approx 40 \text{ g de protéine de pois à consommer après l'entraînement.} \end{aligned}$$

De manière générale, on peut calculer la quantité de protéine à consommer après l'entraînement en suivant ce calcul :

$$\frac{3,5 \times 100}{\text{teneur en leucine de la protéine (en enlevant le \%)}}$$

- Qu'en est-il d'une consommation au-delà des recommandations ?

Excès de protéines et impact réel sur l'hypertrophie ?

Il est alors établi qu'une consommation quotidienne en protéines de 1,6 g/kg/jour est une moyenne à maintenir dans un objectif d'hypertrophie, néanmoins, de nombreux chercheurs se sont posés la question des effets à long terme en cas de dépassement de ce seuil. [40]

Les nombreuses études d'Antonio et al. sur des sujets pratiquant de la musculation [41, 42, 43, 44] ont permis de conclure sur une consommation supérieure à 1,6 g/kg/jour de protéines :

- Aucun gain de masse maigre en comparant un apport journalier de 4,4 g/kg par rapport à un apport de 1,6 g/kg
- Pas d'augmentation significative de masse grasse chez un sujet consommant 2,5 g/kg de protéines par rapport à un autre en consommant 3,3 g/kg malgré une augmentation de l'apport calorique total du fait de l'augmentation de l'apport en protéines
- Une consommation de protéines bien supérieure aux recommandations n'engendre pas d'effets néfastes sur la santé sur le long terme, en se basant sur une liste de divers marqueurs (dont marqueurs rénaux) et sur un profil lipidique sanguin.

Numes et al. (2022) stipulent également qu'une ingestion de protéines > 1,6 g/kg/jour semble avoir des effets dérisoires sur la force du haut du corps, et augmente légèrement la force du bas du corps [45]. Ainsi, même si certains athlètes veulent optimiser leur prise de masse musculaire en consommant des quantités de protéines supérieures, il apparaît qu'une telle quantité consommée ne soit pas réellement nécessaire au vu du faible bénéfice engendré.

Néanmoins, les résultats de ces deux études ne corroborent pas totalement avec celle de Longland et al. [46]. Celle-ci a été réalisée sur des sportifs pratiquant à la fois des sprints et de la musculation en comparant un apport journalier en protéines de 2,4g/kg contre 1,2g/kg dans un autre groupe.

Il a été constaté chez les sportifs consommant 2,4g/kg de protéines par jour :

- Un gain de masse maigre (+1,2 kg de muscles)
- Une perte de masse grasse (- 4,8 kg de graisse corporelle)

Et chez les sportifs consommant 1,2g/kg de protéines par jour :

- Maintien de la masse maigre (aucune perte et pas de gains)
- Perte de masse grasse (- 3,5 kg)

L'effet de perte de masse grasse engendré par la consommation accrue de protéines peut s'expliquer par le fait que leur digestion entraîne un effet thermique supérieur et plus coûteux en énergie. Par ailleurs, les protéines sont des macronutriments rassasiants : le sujet est alors plus propice à une diminution de fringales et envies de grignoter.

Dans les faits, il n'existe pas de protocole strict selon lequel le sportif de force doit obligatoirement se limiter aux 1,6g de protéines / kg/jour. Il s'agit plutôt d'un intervalle, compris entre [1,6 ; 2,4 g de protéines/kg/jour] dans lequel sa consommation devrait se situer. Au-delà, la réponse anabolique plafonne : le système digestif se retrouve surchargé et l'on assiste à une dégradation de plus en plus importante de protéines au fur et à mesure que la consommation augmente (pour une consommation au-delà de l'intervalle). Ce phénomène a été étudié par Gaine en 2006 [47] : il a été rapporté que lors d'un apport en protéines de 3,6g/kg/jour, la dégradation des protéines ingérés s'élevait à 54%. D'autre part, selon Sallinen

(2004) [48] "*Plus l'apport en protéines augmente, plus la capacité du corps à produire de la testostérone diminue*". Or, nous avons vu dans la première partie que la testostérone est une hormone anabolisante. Il n'y a donc pas de réel intérêt à une surconsommation de protéines dans le cadre d'un gain de masse maigre.

Ainsi, si certains sportifs voient leur masse musculaire augmenter suite à un apport au-delà des recommandations, les résultats semblent assez disparates. Cependant, tous semblent stipuler qu'un apport minimal de 1,6 g/kg/jour est suffisant pour maintenir l'organisme dans un état anabolique. Aller au-delà n'est que peu pertinent, et seulement adapté aux sportifs de haut niveau où dont la masse maigre est déjà conséquente. Il ne faut pas oublier non plus que les protéines sont très rassasiantes et apportent 4 kcal/g : mieux vaut prévoir des quantités de nourriture que le sujet pourra facilement consommer et qui correspond à son budget. Par ailleurs, pour avoir une prise de masse contrôlée et limiter la prise de masse grasse au cours de ce processus, l'apport calorique global est aussi à prendre en compte. En ayant un apport en protéines bien supérieur aux recommandations, le sportif se voit consommer un apport calorique supplémentaire qu'il devra intégrer au sein de son quota calorique quotidien et bien souvent, cet apport peut le mener à diminuer ses apports en glucides pour contrebalancer, ce qu'il faut éviter car les glucides lui seront aussi bénéfiques (*cf. partie II b*)

Excès de protéines et incidence sur la santé ?

Pendant de longues années, les protéines ont subi une mauvaise presse : suite aux régimes hyperprotéinés tels que le régime DUKAN et autres régimes restrictifs, nombreux sont les individus qui se sont heurtés à des problèmes de santé plus ou moins graves. D'autre part, les personnes souffrant d'insuffisance rénale sont soumises à un régime alimentaire appauvri en protéines ce qui nous pousse à croire qu'une consommation riche en protéines serait nocive pour la santé. Deux choses sont à considérer concernant les précédentes hypothèses : la première étant que les régimes trop restrictifs entraînent des dommages non seulement corporels mais aussi mentaux car sources de carences en tous types de nutriments; la deuxième étant que la consommation riche en protéines prônée par cette thèse s'adresse à des individus bien portant et pratiquant une activité physique régulière : le régime alimentaire sera alors différent d'une personne souffrant de pathologies chroniques. Nombreuses sont les études et revues prouvant qu'un apport, même conséquent, en protéines ne cause pas de dommages au niveau rénal et hépatique et ce, même sur une consommation allant jusqu'à 4g de protéines/kg de poids corporel/jour et pendant 1 an [29]. L'OMS affirme d'ailleurs un "manque de preuves liant une alimentation riche en protéines à une maladie rénale" [49].

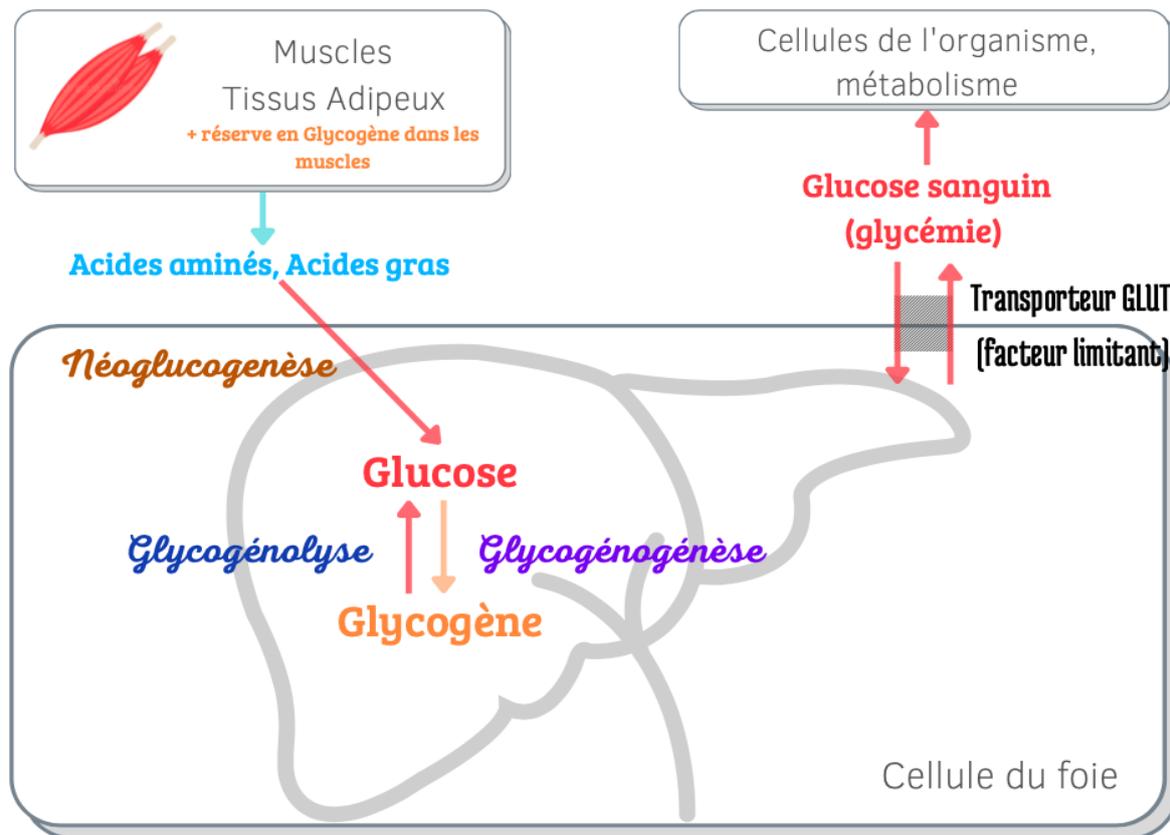
En somme, les études prouvant l'efficacité d'un apport protéique dans un objectif d'hypertrophie sont nombreuses et variées. Les protéines constituent un allié de choix chez un sportif de force. Mais qu'en est-il de la place des glucides et des lipides ?

b) Les glucides

A l'instar des protéines et des lipides, les glucides sont considérés comme étant non essentiels pour l'Homme car notre organisme est capable, via la néoglucogenèse, de générer du glucose. Néanmoins, un apport suffisant en glucides est à conserver pour l'athlète en désir d'hypertrophie car ils participent à la régénération d'ATP et au soutien de la contraction musculaire [50].

- Quelques notions préalables

Avant d'aborder plus précisément l'impact des glucides dans la nutrition du sportif en recherche d'hypertrophie, il est important de connaître le devenir du glucose dans notre organisme à l'aide de ce schémas simplifié (**figure 10**) :



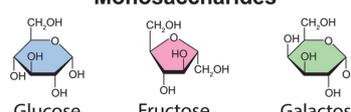
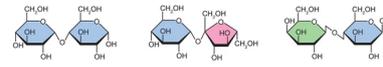
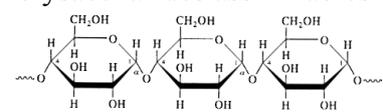
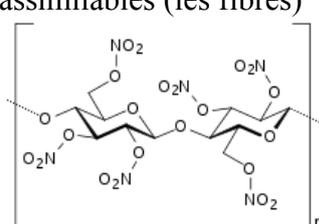
Chloé Nga - Le devenir du glucose dans l'organisme

Fig. 10 : Schémas : le devenir du glucose dans l'organisme

- Une prise alimentaire va provoquer une hausse de la glycémie alors qu'un effort physique de longue durée va avoir tendance à l'abaisser
- Le glucose peut rentrer dans cellules *via* une famille de transporteur nommé GLUT (Glucose transporter), où il pourra être transformé en glycogène dans le foie et les muscles *via* la glycogénogénèse et être mis en réserve
- Lorsque la demande énergétique est forte, comme c'est le cas lors d'un entraînement, le glycogène est converti en glucose *via* la glycogénolyse et transporté à nouveau vers la circulation sanguine puis vers les cellules de l'organisme principalement au niveau des cellules musculaires

- La néoglucogenèse permet un apport supplémentaire en glucose via les AA, le lactate et le glycérol
- La réserve en glycogène des muscles va servir à fournir de l'énergie aux muscles en activité

Il existe plusieurs types de glucides, en voici quelques exemples :

TYPE	EXEMPLES	CONTENU DANS...
<p>Monosaccharides</p> <p>Monosaccharides</p>  <p>Glucose Fructose Galactose</p> <p><small>shutterstock.com - 2114376764</small></p>	<p>Glucose Fructose Galactose</p>	<p>Fruits Lait Produits transformés sucrés</p>
<p>Disaccharides</p> <p>Disaccharides</p>  <p>Maltose Sucrose Lactose</p> <p><small>shutterstock.com - 2116498007</small></p>	<p>Saccharose Lactose Maltose</p>	<p>Lait Betterave Houblon</p>
<p>Polysaccharides assimilables</p> 	<p>Amidon</p>	<p>Pommes de terre Céréales Légumes secs</p>
<p>Polysaccharides non assimilables (les fibres)</p> 	<p>Cellulose Hémicelluloses Pectines Mucilages Gommes</p>	<p>Graines Légumes secs Légumes verts Fruits</p>

Source : Julien Venesson, 2011, *Nutrition de la force*, Editions Thierry Souccar.

Il est important de varier les types de glucides afin d'augmenter la quantité de glucose circulant. Cet effet peut s'expliquer par le fait qu'ils n'utilisent pas tous le même transporteur intestinal et la co-ingestion de plusieurs sources de glucides en même temps permet une disponibilité plus rapide et plus conséquente du glucose au niveau des tissus cible et des cellules hépatiques, comparativement à l'ingestion d'une source unique. Voici quelques exemples de glucides et leur taux d'oxydation comparativement au glucose [51] :

- Le taux d'oxydation des hexoses (fructose et galactose) est inférieur à celui du glucose car ils subissent une conversion en glucose dans le foie avant d'être utilisables par le muscle. Mais lorsque leur apport est combiné au glucose, il a été démontré que cela permettait d'augmenter l'oxydation des glucides dits exogènes d'environ 50%. Trouvables principalement dans les fruits, le fructose a toutefois le désavantage de

provoquer des troubles gastro-intestinaux chez des individus au transit sensible ou bien suite à une consommation excessive.

- Tout comme le fructose, le saccharose permet aussi d'augmenter l'oxydation des glucides endogènes s'il est en association.
- Glucose et maltose sont oxydés à des taux équivalents.
- Les polymères de glucoses sont quant à eux très bien tolérés au niveau digestif, même à forte dose, ce qui en fait un allié de choix pour les efforts intenses et longs nécessitant des apports glucidiques plus conséquents. Ils ont un taux d'oxydation semblable au glucose mais leur goût moins sucré permet d'en consommer de plus grandes quantités. Leur consommation n'est pas primordiale dans le cadre d'un exercice de force où l'effort est court et intense.

Au-delà du type de glucides à ingérer, il faudra aussi faire attention à l'index glycémique de chacun d'eux afin d'en tirer tous les bénéfices. "L'index glycémique (IG) est l'aire sous la courbe de la glycémie d'un glucide donné, par rapport au glucose (auquel on attribue, par conversion, la valeur 100)". Autrement dit, l'index glycémique est une mesure de la vitesse à laquelle un aliment riche en glucides élève le taux de sucre dans le sang. Le glucose a un indice glycémique de 100, et c'est par comparaison à cette donnée que l'on déterminera si un aliment a un index glycémique bas ou élevé.

En voici quelques exemples :

ALIMENTS À FAIBLE IG (<55)	ALIMENTS AYANT UN IG MOYEN (55-70)	ALIMENTS À IG ÉLEVÉ (>70)
Pâtes al dente Fructose : dont ceux issus des poires, oranges, raisins... Yaourt nature Chocolat noir	Riz basmati Banane mûre Pâtes bien cuites Pain aux céréales Sucre blanc (raffiné)	Pain blanc Pommes de terre bien cuites La majorité des produits industriels (biscuits, céréales raffinés et sucrés, ...) Riz blanc à cuisson rapide Maïzena Glucose

Source : Foster-Powel, K., Holt, S.H.A, Brand-Miller, J.C. 2002. International tables of glycaemic index and glycaemic load values. *American Journal of Clinical Nutrition*, 76:5-56.

Il est intéressant de noter que :

- Plus un fruit mûrit, plus son IG s'élèvera
- La cuisson des céréales peut élever l'IG : des pâtes *al dente* ont un IG inférieur à des pâtes bien cuites.
- Lorsque l'on associe aliments à IG élevé à un repas équilibré, son IG s'abaisse
- Plus un produit est raffiné, plus son IG est élevé (privilégier les pâtes, le riz... complet)
- Un aliment refroidi après cuisson a un IG inférieur à son état chaud : riz, pommes de terre, ...
- Plus un aliment est gras, moins son IG sera élevé (car digestion lente)

Les aliments à IG bas seront plus rapidement stockés sous la forme de glycogène musculaire tandis que les aliments à IG élevés, pris à haute dose et en dehors de l'entraînement, seront

préférentiellement stockés sous la forme de triglycérides via la lipogenèse suite à la sécrétion d'insuline.

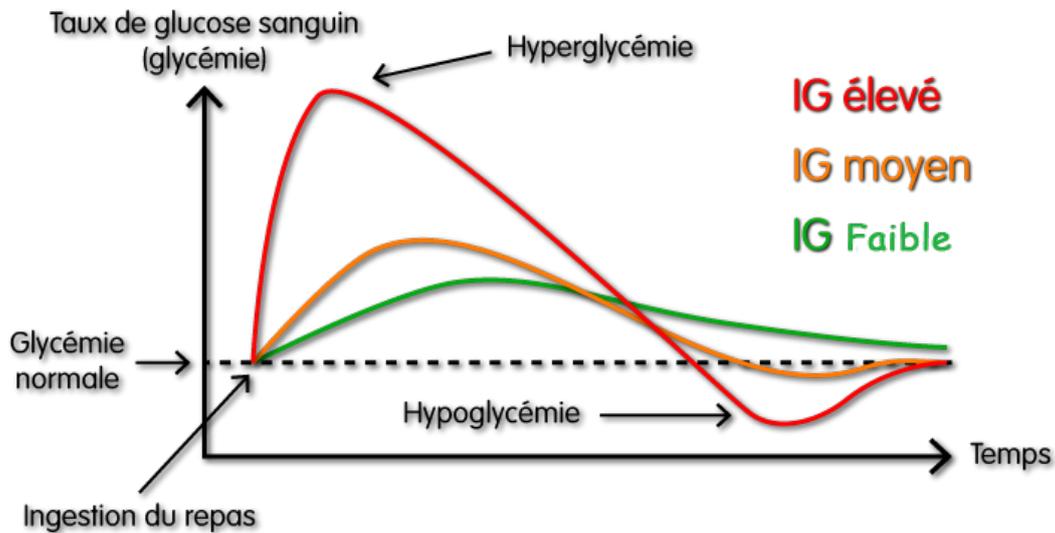


Fig. 11 : Aliments à index glycémiques élevé, moyen et faible et leurs effets sur la glycémie

Source : <https://www.lanutrition.fr>

Comme le montre la **figure 11**, un aliment à IG élevé provoquera plus rapidement une augmentation rapide de la glycémie avec un risque d'hypoglycémie précoce tandis que les aliments à IG faible assurent plus de stabilité au niveau de la glycémie. Il faudra donc porter une attention particulière au moment de la prise d'un aliment à IG élevé lorsqu'un entraînement est prévu afin d'éviter tout risque d'hypoglycémie pendant la séance. Les aliments à IG faible à modérés pourront être préférentiellement pris en période de repos et ceux à IG élevés seront à privilégier en intra-entraînement. Ce consensus n'est, pour autant, pas figé : comme nous l'avons vu précédemment, lorsqu'un aliment à IG élevé est pris au sein d'un repas complet, son IG s'abaisse. Il est de ce fait tout à fait possible de consommer ces aliments en période de repos : tout est une question d'équilibre et de sensibilité propre à chacun.

- Intérêt des glucides chez un sportif de force

Lorsque l'athlète fournit un effort de haute intensité, le glycogène provenant des réserves musculaires est la principale source d'énergie puisque la glycolyse (qui fait suite à la glycogénolyse) peut fournir jusqu'à 80% de la demande en ATP au cours de la série [53]. Ces réserves en glycogène ont aussi un impact sur l'anabolisme car elles provoquent un signal négatif sur l'AMPK. Lorsque cette voie est inhibée, c'est la voie mTORC1 anabolique qui prend le dessus. A l'inverse, lorsque les réserves en glycogène se font rares, le complexe mTORC1 (très énergivore) ne peut plus fonctionner correctement, l'inhibition sur l'AMPK disparaît et cette voie, permettant de générer de l'ATP en relai mais de façon non optimale, devient alors prioritaire (*cf. partie I*).

Les réserves endogènes de glycogène (foie \approx 80-100g et muscle squelettique : 300-400g) [24], limitées, vont permettre de soutenir le sportif au cours de son effort pendant quelques heures, dépendamment de l'intensité et la durée de l'exercice.

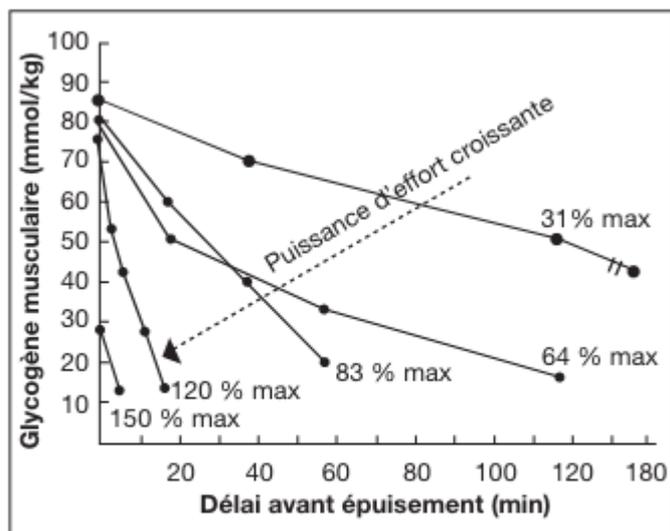


Fig. 12 : Délai d'épuisement des stocks en glycogène musculaire en fonction de l'intensité de l'exercice

Source : J.-A. Nazare, F. Péronnet, et M. Laville, « Sucres, métabolisme musculaire et exercice physique », Cahiers de Nutrition et de Diététique, vol. 43, p. 2S17-2S20, déc. 2008, doi: 10.1016/S0007-9960(08)71551-7.

Comme nous pouvons le voir sur la **figure 12**, plus l'effort fourni est intense, plus les réserves en glycogène diminuent rapidement.

Au cours de l'effort de résistance, ces réserves s'amenuisent de 24 à 40% [53], diminuant alors la force et l'énergie de l'athlète (malgré l'apport en ATP suite à la ré-activation de l'AMPK) : l'intensité d'exécution s'en retrouve alors détériorée, ce qui fait de cet épuisement en glycogène un facteur limitant la bonne exécution de l'entraînement [54].

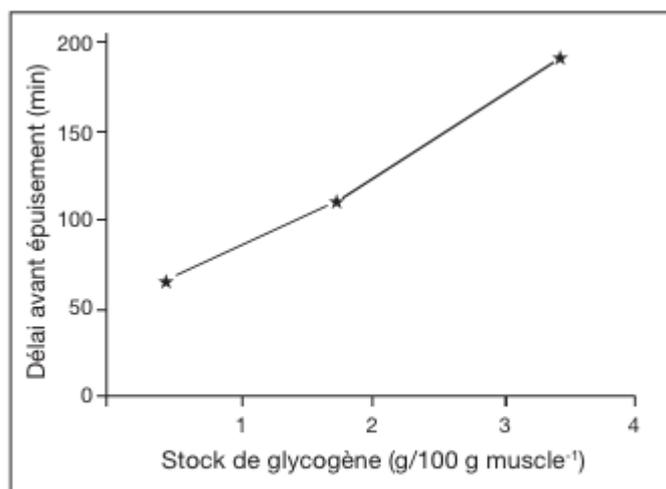


Fig. 13 : Délai d'apparition de la fatigue en fonction des niveaux de stocks de glycogène musculaire

Source : J.-A. Nazare, F. Péronnet, et M. Laville, « Sucres, métabolisme musculaire et exercice physique », Cahiers de Nutrition et de Diététique, vol. 43, p. 2S17-2S20, déc. 2008, doi: 10.1016/S0007-9960(08)71551-7.

En effet, la **figure 13** montre que plus les stocks en glycogène sont bas, plus vite le sujet s'épuise au cours de sa séance. La diminution de la glycémie va aussi impacter les protéines musculaires car l'effet anti-catabolique de l'insuline sera limité au cours de l'exercice [55]. Par ailleurs, le mTORC1 ne peut plus exercer ses fonctions une fois les réserves en glycogène amoindries, constituant alors un frein supplémentaire à l'anabolisme musculaire intra-entraînement.

Un apport exogène en glucose peut également fournir de l'énergie pendant l'entraînement et, pris en période de repos, il servira à reconstituer les réserves en glycogènes des muscles, dans le but de pouvoir fournir des performances suffisantes à la prochaine séance [56]. Ces stocks sont entièrement reconstitués sous 24h, période pendant laquelle le(s) muscle(s) appauvri en glycogènes ne peuvent fournir un effort suffisant pour un entraînement de résistance : c'est l'une des raisons pour lesquelles il ne faut pas entraîner le même groupe musculaire deux jours d'affilée [57].

Aussi, l'apport en glucides pendant l'entraînement permet de maintenir un bilan azoté positif car cela va élever l'insuline et aura pour conséquence de diminuer l'utilisation des AA (effet anti-catabolique).

- **Recommandations nutritionnelles**

Selon les recommandations nutritionnelles, un athlète d'endurance ou de force devra idéalement consommer **5 à 12 g/kg/jour de glucides**, les quantités les plus élevées de cet intervalle seront allouées aux sportifs dont la durée hebdomadaire d'entraînement atteint les 12h ou bien ceux réalisant des sports à haute intensité et de longue durée [58, 59, 60]. Il convient alors de statuer plutôt pour un apport glucidique journalier avoisinant les **5 à 7g/kg** pour un athlète pratiquant régulièrement de la musculation. Un apport excessif en glucides (de l'ordre de 70% des apports journaliers totaux recommandés) n'entraîne pas plus d'effets sur les performances mais un apport réduit (soit 25% des AJR) peut au contraire réduire les performances par manque d'énergie au cours de l'entraînement [61]. Il a d'ailleurs été démontré qu'un régime cétogène (faible en glucides) suivi sur le long terme était délétère pour une synthèse protéique optimale et le maintien musculaire [62, 63]. Sachant qu'1g de glucides équivaut à **4 kcal**, les calories ingérées via les glucides seront à prendre en compte dans le calcul de l'apport calorique total sur la journée car les apports glucidiques supplémentaires aux calories brûlées via l'exercice et dépensées via le métabolisme basal seront directement utilisés pour être stockés sous forme de triglycérides. Ainsi, pour une prise de masse contrôlée (soit pauvre en masse grasse), il convient de gérer ses apports glucidiques journaliers en fonction de son quota calorique quotidien (*soit apport calorique total de la journée - apports en protéines - apports en lipides = apports caloriques restants à allouer aux glucides*), au-delà de suivre les valeurs précédemment indiquées. Par ailleurs, il est à noter qu'une femme aura un rythme d'oxydation des glucides et des acides gras différent d'un homme : cette donnée est aussi à prendre en compte dans la quantité de glucides à consommer quotidiennement.

- **A quel moment ?**

Bien souvent, l'apport glucidique global et le total calorique est atteint mais si le sportif veut optimiser sa prise de glucides, il faudra qu'il la privilégie autour de l'entraînement pour soutenir la synthèse protéique et la reconstitution des stocks en glycogène et pendant l'entraînement pour apporter un regain d'énergie via la glycolyse.

Selon les recommandations, un apport en glucides de **1 à 4g/kg dans les 1 à 4h précédant l'exercice** serait suffisant pour en extraire les bénéfices sur la séance. Mais selon le type d'exercice et le moment de la prise, cet apport sera à contrôler si l'on veut éviter un effet contre-productif. En effet, pris à haute dose ou avec un IG trop élevé, la réponse insulínique engendrée peut provoquer une hypoglycémie réactive, étant alors à l'origine d'une fatigue précoce au cours de la séance. Pour éviter cet effet, il convient alors de consommer environ 1g de glucides/kg avant l'entraînement et de consommer une autre portion pendant l'entraînement.

D'après Cholewa et al. [64], pour un exercice de résistance à haute intensité et à durée moyenne (soit 8 séries en 45min), l'absence d'apport glucidique avant la séance ne produit pas d'effets négatifs sur les muscles mais lorsqu'un apport en glucides a bien lieu, cela permet une amélioration des performances, de l'endurance et d'accroître l'hypertrophie. Ces résultats ont été également suggérés sur des séances plus longues (>50min) et d'intensité plus modérée. En cas d'apport en glucides au cours de l'entraînement, de nombreuses études stipulent que la consommation de plusieurs sources de glucides (saccharose, fructose, maltodextrine, ...) [24] en même temps donne un meilleur résultat au niveau de l'oxydation des glucides que la prise d'un seul type (*cf. Taux d'oxydation des glucides*). Pour un mélange optimal, on privilégiera le rapport 1-1,2 pour la maltodextrine ajoutés à 0,8-1 pour le fructose, un mélange qui semble donner les taux d'oxydation les plus élevés.

Après la séance et dans le cadre d'une recherche d'hypertrophie, il est également recommandé de consommer **1g de glucides à index glycémique élevé / kg / h dans les 2 à 4h** qui suivent l'entraînement afin de reconstituer les stocks en glycogènes.

Cependant de nombreuses études affirment que si les apports glucidiques et protéiques au cours de la journée sont atteints et bien répartis, la prise de glucides autour et pendant l'entraînement paraît peu pertinente dans le cadre d'un entraînement de résistance. [65, 66, 67, 68]. En effet, les effets anti-cataboliques de l'insuline atteignent un plateau à des concentrations de 15 à 30 μ IU/mL, ce qui équivaut à un shaker de 45 g d'isolat de protéines de lactosérum [69]. De ce fait, dans le cadre d'un entraînement de résistance, l'apport le plus important à surveiller autour de l'entraînement est l'apport en protéines mais leur implication dans l'insulinosécrétion implique que la prise de glucides sera préférentiellement réalisée conjointement à cet apport. De nombreuses études, dont celle de Bird et al. (2006) [70] affirment qu'une consommation de maltodextrine (glucides) corrélée à un apport en AA (type BCAA), serait un réel booster pour les performances physiques, diminuant alors de 27% le catabolisme intra-entraînement et augmentant la synthèse protéique via l'apport en AA. Il a aussi été rapporté que l'apport en glucides et en AA avant et/ou pendant la séance permettait d'avoir un volume d'exercice plus conséquent car compensatrice de la perte en énergie. Le moment le plus opportun a été étudié par Tipton et al. [71] et selon eux, la prise de glucides (sous la forme de maltodextrines) et d'AA (préférentiellement sous la forme de BCAA) avant la séance serait plus pertinente qu'une prise après la séance, dans le cadre d'un entraînement d'environ 45 min (c'est généralement le cas dans le cadre de la musculation). En apportant des glucides exogènes en cours de séance, cela limite l'utilisation du glycogène endogène comme source d'énergie car c'est ce qui a été consommé via l'alimentation qui va être utilisé en premier. D'autres en revanche stipulent qu'une consommation de glucides associée à des protéines est tout aussi pertinente en période de repos, soit en post-entraînement. L'apport de glucides dans des conditions d'hyperaminoacidémie va permettre de diminuer la dégradation des protéines musculaires (diminution d'environ 60% de la dégradation comparé à une ingestion de glucides seul) [72] tandis que la prise de leucine va activer le complexe mTORC1 (en phosphorylant ses substrats [7]) et diminuer le taux d'oxydation des AA. Ceci a pour effet d'augmenter l'anabolisme d'environ 50% comparativement à un apport en glucides seul (si apport en protéines + glucides ou bien protéines + glucides + leucine en post exercice) [72].

Néanmoins, cette étude révèle que si au cours de cette période de repos le sportif ingère des glucides seuls, le bilan de synthèse net sera négatif : il n'y aura pas d'apport suffisant en protéines pour permettre l'anabolisme musculaire. A l'inverse, la co-ingestion de protéines et de glucides va permettre d'augmenter de près de 250% la réponse insulinaire, comparativement à la prise de glucides seuls. Or, rappelons que l'insuline fait partie des stimuli du complexe de synthèse protéique mTORC1. Toutefois, il est à noter qu'en l'absence d'un taux suffisant en AA, l'insuline ne peut pas jouer ce rôle anabolisant.

En résumé :

- Apports en **glucides seuls** : avant et pendant l'entraînement : **OK** → pour booster l'énergie, mais attention à l'hypoglycémie réactionnelle
- Apports en **glucides + BCAA** : avant et/ou pendant l'entraînement : **OK ++** → pour booster l'énergie + pour atténuer le catabolisme musculaire
- Apports en **glucides seuls** : après l'entraînement : **déconseillé** (synthèse protéique non optimale)
- Apports en **glucides + source complète de protéines et BCAA** : après la séance : **OK ++** → reconstitution des stocks en glycogène + synthèse protéique optimale

En somme, dans le cadre d'un entraînement de résistance, les glucides constituent un bon apport énergétique pour soutenir le sportif au cours de sa séance et permet une meilleure récupération. La synthèse protéique obtient des résultats peu concluants si la prise de glucides se fait seul. Ainsi, la co-ingestion de protéines et de glucides paraît plus pertinente chez le sportif de force : le regain d'énergie permettra un volume d'exercice plus conséquent et l'apport en protéines permettra une synthèse protéique optimale en période de repos. Même si les résultats diffèrent d'une étude à l'autre sur l'importance du timing de prise de glucides et de son importance dans la recherche d'hypertrophie, il est toutefois préférable de les consommer autour de l'entraînement pour ne pas risquer de diminuer les performances au cours de l'entraînement et pour reconstituer les stocks en glycogène. Ceci dit, le sportif devra tout de même faire attention à ses besoins énergétiques totaux : le premier à prendre en compte est l'apport en protéines, puis vient l'apport en lipides et enfin l'apport en glucides sera le dernier à être pris en compte et sa quantité sera déterminé en fonction du nombre de calories restantes à consommer dans la journée.

c) Les lipides

- Intérêts et recommandations nutritionnelles

Les lipides sont les derniers macronutriments qui préoccupent les sportifs de force, au vu des nombreuses preuves allouées aux protéines et aux glucides quant à la prise de masse maigre, à l'augmentation de la satiété, aux bénéfices sur la récupération musculaire et sur la performance à l'entraînement. Pourtant, de nombreux lipides sont vitaux pour les fonctions de l'organisme et permettent, entre autres, la reconstitution des réserves intramusculaires de triacylglycérol et la mise à disposition d'acides gras essentiels au service de l'organisme.

Pour un sportif de force, les recommandations nutritionnelles sur l'apport en lipides restent similaires à celles que l'on recommande aux personnes sédentaires, c'est-à-dire, une consommation variant de **20 à 35% de l'apport énergétique total**, sachant qu'1g de lipides = 9 kcal [40]. Ces 20 à 35% équivalent à un apport d'environ 0,5 à 1,5g/kg/jour de lipides mais il est préférable de se fier plutôt aux pourcentages car chaque individu a des besoins caloriques différents (*cf. partie II-d*). En période de "sèche", l'athlète pourra se limiter à 20% de lipides dans ses apports journaliers (*certaines peuvent aller jusqu'à 8% [73] mais sur une courte période précédant la compétition, ce n'est toutefois pas conseillé du fait des effets néfastes sur la santé*) tandis qu'un athlète qui est en quête d'hypertrophie pourra viser les 30 à 35% [24].

Une consommation de lipides supérieure à ce taux ne serait pas judicieuse car les lipides sont les macronutriments les plus riches en termes de calories et en consommer plus tout en veillant à respecter l'apport en protéines implique soit une augmentation de l'apport calorique total soit

une compensation par diminution de l'apport en glucides, ce qui serait contre-productif. De plus, plusieurs études dont celle de Wilson et al. (2017) [79] sur les régimes cétogènes impliquant une réduction drastique de l'apport en glucides (10%) et un apport élevé en lipides (60 à 80%) démontrent qu'il n'y a pas de réel intérêt pour un sportif de force d'adopter ce type de régime dans le sens où il n'a pas fait ses preuves ni dans le gain de masse musculaire ni dans une perte significative de masse grasse.

- Lesquels privilégier ?

Les lipides sont constitués d'acides gras, regroupés en 3 catégories :

- **Acides gras saturés** : souvent décriés, ils n'ont réellement d'effets délétères sur l'organisme que lorsqu'ils sont consommés en excès. A de fortes doses, il y a un risque d'augmentation de résistance à l'insuline (et à terme de diabète) et/ou de diminution de la lipolyse. Ils ne sont pas "essentiels" car l'organisme est capable d'en produire à partir des réserves en glucides.
- **Acides gras monoinsaturés** : catégorie dans laquelle on peut retrouver l'oméga 9 (ex : dans l'huile d'olive) dont la consommation peut être bénéfique pour certaines pathologies cardiovasculaires, cancers ou dans certaines ulcérations gastriques.
- **Acides gras polyinsaturés** : ce sont les plus intéressants dans notre cas. Sensibles à l'oxydation et à la chaleur, ils renferment plusieurs acides gras dits "essentiels" tels que les oméga 3 et 6, accessibles uniquement via l'alimentation. Ils ont de nombreux effets bénéfiques sur la santé (cardiovasculaire, articulations, cancers, ...) à condition de respecter un **rapport oméga 6/oméga 3 de 5/1** (selon l'Anses).

Les oméga 3

- **ALA** : Acide Alpha-Linolénique : dans les graisses végétales (huile de colza, huile de noix)
- **EPA** : Acide eicosapentaénoïque
- **DHA** : Acide docosahexaénoïque : dans les graisses animales, surtout dans les poissons gras (saumon, thon, maquereau, sardines, ...). Les oméga 3 du saumon et du thon sont directement assimilables par l'organisme mais leur consommation doit être limitée car à haute dose, les métaux lourds toxiques qu'ils contiennent (ex : *Mercur*e) ont des effets délétères pour l'organisme. Les autres types de poissons gras pourront être consommés dans de plus grandes quantités.



NB : On peut générer de l'EPA et du DHA à partir d'ALA mais c'est une conversion qui donne des résultats très faibles. Ainsi, mieux vaut diversifier ses apports en oméga 3.

Les oméga 6

- **AL** : Acide linoléique
- **AA** : Acide arachidonique

Les oméga 6 se retrouvent en grande quantité dans les graisses d'animaux provenant d'élevages industriels, dans toutes les huiles végétales (sauf dans l'huile d'olive, colza, lin et macadamia), dans le maïs, le soja et l'avoine.



AA et **EPA** sont notamment utiles à la production de prostaglandines qui vont permettre, entre autres, une action anti-inflammatoire, de relaxation et de récupération musculaire. Cet apport est d'autant plus pertinent quand on sait que l'effort physique induit une inflammation qui peut altérer les muscles.

Selon le rapport de l'Anses, la consommation de la population actuelle se rapproche plutôt d'un rapport de 20/1 (oméga 6 / oméga 3). Ainsi, il conviendra de rétablir un rapport de 5/1 en diminuant l'apport en oméga 6 et/ou en augmentant l'apport en oméga 3.

Ainsi, un sportif de force devra consommer une quantité de lipides à hauteur de 20 à 35% de ses apports journaliers en veillant à maintenir un rapport oméga 3 / oméga 6 de 5/1. Pour l'aider à maintenir ce rapport, de nombreux compléments alimentaires existent (*cf. partie III*). Néanmoins, les recherches sur la quantité optimale de lipides à consommer dans un but d'hypertrophie sont, à ce jour, peu nombreuses. Les intervalles précédemment cités sont surtout des recommandations dites "vitales" mais n'ont pas fait de réelles preuves quant à la contribution dans la prise de masse maigre.

d) Calculs des besoins caloriques et réalisation du plan alimentaire

Nous avons donc étayé l'apport optimal de chacun des macronutriments ainsi que leurs intérêts chez le pratiquant de musculation. Mais comment intégrer ces connaissances dans la préparation d'un plan alimentaire adéquat ?

Étape 1 : Le calcul du métabolisme basal et des calories dépensées quotidiennement

La première étape consiste à évaluer son métabolisme basal, autrement dit, les calories que notre organisme dépense pour le maintien de ses fonctions vitales. Ce métabolisme basal est différent d'un sujet à l'autre, en fonction de son poids, sa taille, son sexe. Il peut aussi être nettement diminué à la suite de régimes restrictifs à répétition et s'installant sur de longues durées mais peut être rétabli, voire augmenté, par le biais de ce que l'on appelle une "*Reverse Diet*". C'est un processus long qui consiste en une élévation de l'apport calorique dans un premier temps pour forcer une augmentation du métabolisme basal avant de diminuer l'apport calorique dans un deuxième temps.

Il existe de nombreuses équations pour estimer facilement à l'aide des paramètres anthropométriques le métabolisme de base.

Parmi les différentes équations, on peut notamment citer celle de **Mifflin St Jeor** [75] :

Chez les hommes :

$$\text{BMR} = 10 P + 6,25 T - 5 A + 5$$

BMR : Métabolisme basal (en kcal)

P : Poids (en kg)

T : Taille (en cm)

A : Age

Chez les femmes :

$$\text{BMR} = 10 P + 6,25 T - 5 A - 161$$

BMR : Métabolisme basal (en kcal)

P : Poids (en kg)

T : Taille (en cm)

A : Age

Selon le niveau d'activité physique, ce BMR sera à multiplier par un coefficient pour obtenir la dépense énergétique totale de l'individu :

Niveau d'activité physique	BMR x
0 : sédentaire	1,2
1 : Activité physique légère : 1 à 2 fois / semaine	1,375
2 : Activité physique modérée : 3 à 4 fois / semaine	1,55
3 : Activité physique modérée : quotidiennement	1,725
4 : Activité physique intense : 6 à 7 fois / semaine	1,9

Une fois le BMR multiplié par le coefficient adéquat, on obtient la quantité totale de calories dépensée par l'individu en un jour (Dépense énergétique totale = DET). Pour un maintien de poids corporel, la quantité de calories à consommer devra être égale à celle dépensée. Pour une perte de masse, il faut que les calories consommées soient inférieures aux calories dépensées. Dans le cadre d'une prise de masse, c'est l'inverse : l'individu devra se mettre en léger surplus calorique (bilan énergétique positif).

Étape 2 : Calcul des besoins caloriques journaliers

Ainsi, dans le cadre d'une prise de masse l'individu devra être en surplus calorique car c'est cet apport en énergie supérieur à l'énergie qui est dépensé au cours de la journée qui va permettre d'amplifier l'anabolisme musculaire. Au niveau hormonal, Forbes et al. (1989) ont démontré que lors d'un apport calorique au-delà des dépenses journalières, les concentrations en hormone de croissance, en testostérone et en IGF-1 tendent à augmenter [76] ce qui permet d'accroître

l'anabolisme musculaire, si cet apport est associé à un entraînement de musculation. Dans le cadre de cette thèse, nous cherchons à optimiser cette prise de masse, c'est-à-dire : impliquant un maximum de gain de masse maigre et un gain de masse grasse (qui est inévitable) minimal. Dans ce cadre, il est important de modérer le surplus calorique afin d'éviter toute augmentation incontrôlée de masse grasse.

L'état d'entraînement du sujet va conditionner le surplus calorique à mettre en place : en effet, à un même surplus calorique, un débutant aura tendance à maximiser le gain de masse maigre avec un gain de masse grasse minime. A l'inverse, chez un sportif de force dont le niveau est plus avancé, son gain de masse maigre sera ralenti par rapport à un débutant et son gain de masse grasse en sera supérieur. L'étude de Garthe et al. datant de 2013 illustre bien ces propos [77] Elle compare les 2 groupes ci-dessous :

Groupe 1 (ALG) :

Poids initial	Niveau	Calories ingérés	Surplus calorique
75 kg	Athlète confirmé	Environ 2 900 kcal <i>Groupe "ad libitum"</i> <i>: leur consommation calorique quotidienne variait au gré de leurs envies mais globalement, il a été relevé que leur consommation avoisinait les 3000 kcal/jour</i>	Faible

Groupe 2 (NCG) :

Poids initial	Niveau	Calories ingérés	Surplus calorique
71 kg	Athlète confirmé	Environ 3 600 kcal <i>L'apport calorique de ce groupe a été plus sous contrôle</i>	Elevé

Les deux groupes ont suivi le même entraînement sur une période de 8 à 12 semaines à raison de 4 séances/semaine.

Au terme de l'étude, voici les résultats obtenus (**figure 14**) :

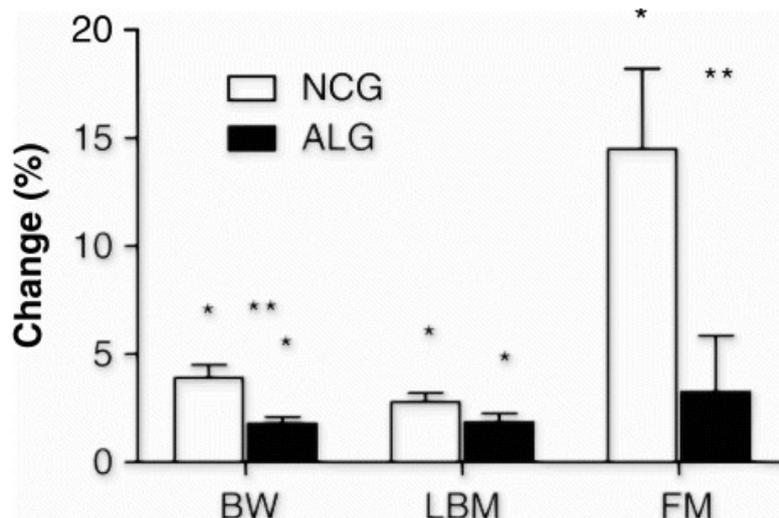


Fig. 14 : Changements dans le poids corporel (BW), la masse grasse (FM), et la masse maigre (LBM) dans le groupe de conseil nutritionnel (NCG) et le groupe ad libitum (ALG). Les données sont présentées sous forme de moyenne±SE.

*p <0,05 significativement différent de la pré-intervention, **p <0,05 différence significative entre les groupes.

Source : Garthe, I.; Raastad, T.; Refsnes, P.E.; Sundgot-Borgen, J. Effect of nutritional intervention on body composition and performance in elite athletes. Eur. J. Sport Sci. 2013, 13, 295–303

Les gains de masse maigre au sein des deux groupes sont sensiblement similaires (+ 1,7 kg de masse musculaire pour le groupe 1 contre +1,2kg pour le groupe 2) mais les gains de masse grasse sont nettement supérieurs dans le groupe 2 c'est à dire dans le groupe d'athlètes ayant eu un surplus calorique élevé. Le groupe 1 a eu une augmentation de masse grasse de 0,2 kg contre 1,1 kg pour le groupe 2.

Ainsi, de façon globale, il est dans tous les cas plus judicieux d'augmenter petit à petit l'apport énergétique dans le cadre d'une prise de masse car les surplus caloriques élevés provoquent plus facilement une élévation du taux de masse grasse, souvent non souhaité par le sportif. De nombreux chercheurs montrent qu'il faudrait idéalement viser l'augmentation calorique de 10 à 20% par rapport aux calories totales afin de tendre à une augmentation de poids de 0,25% à 0,5% du poids initial par semaine [78], au-delà, la prise de poids serait nocive pour la santé et entraînerait un risque accru d'augmentation incontrôlée de la masse grasse.

Ainsi, pour l'apport calorique journalier (AJ) d'un sportif en période de prise de masse, on préconise :

$$AJ = DET + \frac{[10;20]}{100} \times DET$$

AJ = Quantité totale de calories à consommer par jour

DET = Dépense Énergétique Totale

Dans le cadre d'une prise de masse contrôlée, il est préconisé d'avoir un apport calorique avoisinant les +10% par rapport aux dépenses énergétiques totales et de réévaluer cet apport en fonction de la prise de masse observée au cours des semaines. Il est aussi préconisé de réaliser ces calculs chaque mois afin de réévaluer les besoins caloriques au fur et à mesure que le poids augmente (ou bien le réévaluer dès lors qu'une perte de poids est observée).

***NB :** Afin de rendre ces calculs plus simples et rapides, j'ai réalisé un tableau dans lequel, en renseignant le poids, la taille et l'âge dans les bonnes cases, vous obtiendrez l'ensemble des valeurs précédemment citées.*

Lien :

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1bUCEX6vUQNQXjEgL4cCanFUSow993qJaxIvfD2ePvkk/edit?usp=sharing>

Pour l'utiliser, il vous suffira de copier l'ensemble des données et de coller le tout dans un nouveau fichier afin de remplir vos propres valeurs sans modifier le document et permettre à d'autres utilisateurs d'y avoir accès.

Étape 3 : Calcul des macronutriments

Une fois les besoins caloriques journalier calculés, il convient de calculer l'apport en macronutriments correspondant en respectant cet ordre :

- 1) **Calcul des besoins journaliers** : +10% par rapport aux calories d'entretien
- 2) **Calcul de l'apport en protéines** : 1,6 g / kg / jour. Sachant qu'1 g de protéines fait 4 kcal, calculer les calories apportées par les protéines.
- 3) **Calcul de l'apport en lipides** : 20 à 35% des besoins journaliers. Sachant qu'1g de lipides = 9 kcal, calculer le nombre de calories correspondant
- 4) Les calories restantes correspondent à l'**apport en glucides** sachant qu'1g de glucides = 4 kcal.

Au terme de ces calculs et de l'application du plan alimentaire, ce dernier sera à moduler en fonction de la manière dont le sportif réagira. A titre d'exemple, une augmentation de poids supérieure ou égale à 2kg /mois chez un athlète de niveau avancé est considéré comme étant élevé [73] si réalisé sans surveillance d'un professionnel. Par conséquent, il faudra revoir les calories à la baisse.

Ainsi, l'apport calorique quotidien et un apport suffisant et idéalement réparti en macronutriments sont des éléments à ne pas négliger dans le cadre d'une prise de masse musculaire contrôlée. Cependant, il arrive parfois que l'athlète ne puisse pas soutenir de tels besoins et en ce sens, il l'usage de compléments alimentaires prend tout son sens.

FICHE RÉCAP sur les recommandations nutritionnelles clés en ANNEXE 1

Partie 3 : Compléments alimentaires utiles à la prise de masse musculaire

a) Les suppléments protéinés

Comme nous l'avons vu précédemment, le maintien d'un apport en protéines à hauteur d'1,6 g/kg/jour va permettre de soutenir de manière optimale la synthèse protéique et la réparation des fibres musculaires. Néanmoins, certains se heurtent à des difficultés pour atteindre ces objectifs. Par manque de temps, pour une question de praticité, économique ou bien pour intégrer facilement une source de protéines dans les collations, certains se tournent vers les protéines en poudre.

• La whey

La plus répandue dans le milieu de la musculation est la Whey. Il s'agit en réalité de lactosérum qui a été extrait du lait, ce dernier étant constitué à 80% de caséine et à 20% de lactosérum [34][79].

La whey peut être obtenue par divers procédés :

- **La whey fromagère** : il s'agit en réalité de déchets issus de la production fromagère, raison pour laquelle elle est couramment vendue et peu chère. Néanmoins, les processus de fabrication du fromage, mêlant caillage et fermentation du lait, participent à la dénaturation des acides aminés. Ces whey peuvent être utiles au sportif regardant sur son budget mais leur relative pauvreté en leucine en fait une whey de moins bonne qualité, comparativement à la whey laitière.
- **La whey laitière (=whey native = whey bioactive)** : celle-ci est directement issue du lait, par conséquent, son taux de dénaturation des AA est moindre. Du fait de sa teneur en AA, la whey laitière est de meilleure qualité que la whey fromagère mais a un coût supérieur.

Il existe différents types de whey, classés en fonction de leur méthode d'extraction :

- **La whey concentrée** : Il s'agit de la whey dans sa forme initiale. Elle contient environ 80% de protéines sur extrait sec, des glucides (lactose) et des lipides. Sa richesse en lactose peut causer des troubles gastro-intestinaux chez les intolérants et chez d'autres des problèmes cutanés (acné, ...).
- **L'isolat de whey** : cette whey est plus concentrée en protéines (90% minimum) et appauvrie en matières grasses et en lactose ce qui lui confère une meilleure tolérance au niveau digestif.
- **L'hydrolysate de whey** : elle est issue d'une prédigestion du concentré de whey par des enzymes (=hydrolyse) donnant une protéine totalement dénaturée. L'absorption est alors plus rapide mais c'est une whey qui peut causer de nombreux troubles digestifs, de type diarrhéique (à une dose propre à chacun). Elle est également plus amère en bouche, du fait de la présence de résidus de proline engendrés par l'hydrolyse.

Comment les consommer ?

Comme nous l'avons vu précédemment (partie II), la portion idéale de protéine/repas doit être de l'ordre de 0,4g/kg de poids corporel/repas. Ainsi, si l'on établit une moyenne, cela correspond à une portion de 20 à 40 g de whey, si elle est prise en collation seule. Cette whey

pourra être reconstituée dans de l'eau ou du lait (plus consistant, apport en glucides et lipides supplémentaires) et consommé tel quel ou bien être intégré dans des recettes sucrées (pour les whey aromatisées et édulcorées) ou salées (au goût neutre).

Quand en consommer ?

Du fait de sa digestion rapide, la whey constitue la source de protéines idéale en post-entraînement. Malgré un consensus selon lequel pour optimiser la prise de masse musculaire il faudrait un apport idéal d'1,6g de protéines/kg/jour, de nombreuses études se sont posées la question du moment le plus pertinent de la prise. Certains chercheurs ont conclu que, pour les débutants, le moment de la prise importait peu si l'apport quotidien était suffisant. D'autres en revanche stipulent que pour une synthèse optimale chez un athlète de force, cette prise de protéine doit se faire régulièrement tout au long de la journée, à raison de portions de **20g environ tous les 3h** (à adapter en fonction du poids de la personne) et que la prise de protéines suite à l'entraînement doit être faite **entre les 30min et les 3h post-séance** [80] bien que nous ayons vu que cela pouvait être fait sur 24h. La consommation du shaker de whey juste après l'entraînement (<30 min) ne serait pas optimale car cela peut d'une part engendrer des troubles digestifs (système digestif au repos pendant la séance et jusqu'à 20 minutes après celle-ci) et d'autres part la prise n'aurait pas lieu lors du pic d'absorption maximal de protéines qui s'établit à environ 30 minutes après la fin de l'exercice.

Avant la séance, elle peut être consommée dans l'heure précédant l'exercice de force, seule ou accompagnée d'une source de glucides, afin de fournir de l'énergie (*cf. partie II-b*) et un stock en AA utilisables pendant la séance.

Quels en sont les intérêts ?

- **Gain significatif de masse maigre et de force musculaire** suite à la supplémentation en whey, du jeune adulte à l'individu plus âgé (sans comorbidités) [81].
- Selon Morton et al. (2017) [82], la supplémentation en whey serait **d'autant plus effective chez un sujet de niveau avancé** : elle permettrait un gain de masse maigre supérieur comparativement à un débutant.
- À des portions avoisinant les **20 à 40 g**, la whey a la capacité d'**augmenter l'insulinosécrétion sans augmenter la quantité de tissus adipeux** [83]. Or, l'insuline va permettre de stimuler le complexe mTORC1 en faveur de l'anabolisme musculaire en plus de son action anti-catabolique.
- À des portions s'élevant à **70 g**, il a été rapporté que la whey aurait des effets **anti-cataboliques** significatifs, via une voie différente de celle de l'insuline, en plus de leur capacité pro-anabolisante. [84].

Ainsi, à doses moyennes ou élevées, la whey peut apporter un bénéfice supplémentaire dans un objectif d'hypertrophie.

Néanmoins, il est intéressant de noter que lorsque les apports en protéines et caloriques totaux sont respectés, les études de Morton et al. (2017) [87] montrent qu'une supplémentation en whey paraît peu pertinente. La whey porte bien sa qualification de "supplément alimentaire" dans le cadre où elle n'est réellement utile que pour les sportifs qui peinent à atteindre le quota quotidien exigé en protéines dans le cadre d'une prise de masse.

• La caséine



La caséine (80% de la composition du lait), peut aussi être proposée aux consommateurs sous forme de poudre. Au niveau de son profil en AA : elle est très riche en acide glutamique et en tyrosine mais pauvre en arginine et en cystéine (*cf. partie III - b pour le détail de leurs actions*). Elle exerce son effet majeur par l'inhibition de la dégradation des protéines musculaires et peut être pris en alternance avec la whey qui est plutôt orienté vers la synthèse protéique (effet aussi exercé par la caséine, mais plus faible) [90].

L'avantage de la caséine réside dans sa

capacité à maintenir des taux de leucine assez élevés et de manière constante sur la durée, permettant alors de limiter le catabolisme musculaire sur le long terme. Il existe 3 types de caséine :

- **Le caséinate de sodium** : la première forme de caséine à être produite et commercialisée. On en retrouve de moins en moins sur le marché car l'assimilation des AA qu'il renferme est moindre que dans les autres formes de caséine.
- **La caséine micellaire** : c'est la forme la plus utilisée et la plus répandue de caséine. Il ne s'agit généralement pas de caséine pure (100% de caséine) car une partie de sa composition peut être de la whey (en général 10 à 20%).
- **Les hydrolysats de caséine** : tout comme pour l'hydrolysat de whey, l'hydrolysat de caséine est issu d'une pré-digestion de caséine à l'aide d'enzymes. Ils sont dotés d'une absorption rapide mais peuvent engendrer, là aussi, des réactions de type diarrhéiques chez les sujets les plus sensibles.

Comment et quand la consommer ?

Pour la caséine micellaire, sa digestion plus lente que la whey et le caséinate de sodium en fait un allié de choix pour des collations **entre deux repas ou bien la nuit**. Les hydrolysats de caséine peuvent, quant à eux, être pris à des moments similaires à la whey car ils sont à digestion rapide.

Au niveau du mode de consommation, la caséine se trouve sous forme de poudre et peut être consommée de la même façon que la whey.

La protéine idéale en prise nocturne ?

Par sa digestion lente, la caséine micellaire est souvent utilisée chez les sportifs de force en période de jeûne prolongé (la nuit ou lorsque la prochaine prise alimentaire est dans un laps de temps éloigné). Pour les mêmes raisons, de nombreux chercheurs se sont posés la question de la pertinence de la prise de caséine micellaire juste avant le coucher dans le cadre d'une prise de masse. Des études ont révélé que la synthèse protéique était limitée par un stock relativement faible en acides aminés pendant la nuit. Et pour cause, pour un sportif de force qui s'alimente le soir aux environs de 20h et dont le prochain repas a lieu le lendemain à 8h, c'est près de 12h de jeûne. Suivant le type de protéines qu'il ingère, l'absorption sera plus ou moins longue mais

dans tous les cas la prise de 20g ne peut soutenir une synthèse protéique optimale pendant 12h. Même si les résultats montrent que la prise de protéines à digestion rapide de type whey permet une synthèse protéique supérieure à l'ingestion de protéines à digestion lente de type caséine (disponibilité plus rapide des acides aminés dans la circulation sanguine), les effets de ces protéines à digestion rapide deviennent quiescents dans une période de jeûne supérieur à 6h : raison pour laquelle les protéines à digestion rapide seront à privilégier en journée et suite à un entraînement de force mais pas adapté à une collation nocturne. [85, 86, 87]. Par contre cette collation, prise juste avant le coucher, peut être composée de protéines à digestion lente de type caséine ou d'un mélange équivalent en protéines à digestion rapide + lente (ex : whey + caséine). En effet, le taux de synthèse protéique peut être majoré de 22% suite à une collation nocturne de caséine micellaire comparativement à un placebo (maltodextrine) [88]. Cette prise nocturne est surtout orientée pour les athlètes non débutants en musculation qui veulent optimiser leur prise de masse ; pour les autres, se limiter aux apports journaliers recommandés sans se soucier de la plage horaire sera suffisant pour générer une synthèse protéique. La quantité de protéines à ingérer importe également puisque ces résultats sont obtenus suite à l'ingestion d'une portion de minimum 40 g de caséine (les résultats étaient tout aussi significatifs pour un apport de 20 g de caséine + 20 g de whey mais pas pour 40 g de whey). En deçà de ce seuil, et malgré un apport supplémentaire de leucine, les résultats ne diffèrent pas significativement d'une absence de collation nocturne.

- **Les protéines végétales**



Les protéines végétales sont issues des déchets de la production d'huiles végétales. Elles sont adaptées aux pratiquants ayant un régime végétalien. Les plus répandues étant les protéines de soja, de riz et de pois. Comme nous l'avons précédemment abordé dans la partie II, les protéines végétales ont une teneur en leucine moindre que protéines lactières, leur conférant alors, à même dose, des effets anabolisants inférieurs.

Protéines végétales, moins efficaces que les protéines lactières ?

Nous avons vu précédemment que la qualité d'une protéine est définie selon son taux de leucine et son taux d'absorption, mais l'OMS (Organisme mondial de la santé) et la FAO (Alimentation et l'Agriculture) ont établi une mesure plus précise et normalisée en 1989 : le score PDCAAS. Ce "Score d'acides aminés corrigés de la digestibilité des protéines", soit PDCAAS, évalue la capacité de la protéine à satisfaire aux besoins en acides aminés essentiels de l'organisme. Il atteint la valeur de 100% pour certaines protéines, dites "complètes" par leur profil en AA et leur relative bonne digestibilité : caséine, whey, lait, oeufs. Une protéine dont

le PDCAAS < 100% ne peut donc satisfaire pleinement les besoins de l'organisme en AAE : c'est le cas par exemple pour les protéines végétales de manière générale (protéine de pois (89%), la protéine de soja (93%),...) [89]. Ce score inférieur témoigne d'une plus faible teneur en AAE, d'une variété moindre ou bien d'une moins bonne digestibilité de la protéine en question.

*NB : D'autres indicateurs existent, comme par exemple le **DIAAS** (Digestible, Indispensable Amino Acid Score) qui, au-delà de prendre en compte l'ensemble des AA, ne tient compte que des AA digestibles et utilisables et évolue également en fonction de la digestibilité iléale.*

D'autres raisons peuvent expliquer pourquoi les protéines végétales semblent être de moins bonne qualité, en termes de gain de masse musculaire, que les protéines lactières : à titre d'exemple, les polysaccharides non amylacés et les fibres contenus dans les protéines végétales limitent l'accès à certaines enzymes permettant la digestion des protéines. La présence d'anti-nutriments telles que l'acide phytique, les inhibiteurs de protéases, les hémagglutinines, les glucosinolates, et les tannins peuvent aussi freiner la digestibilité des protéines végétales [90].

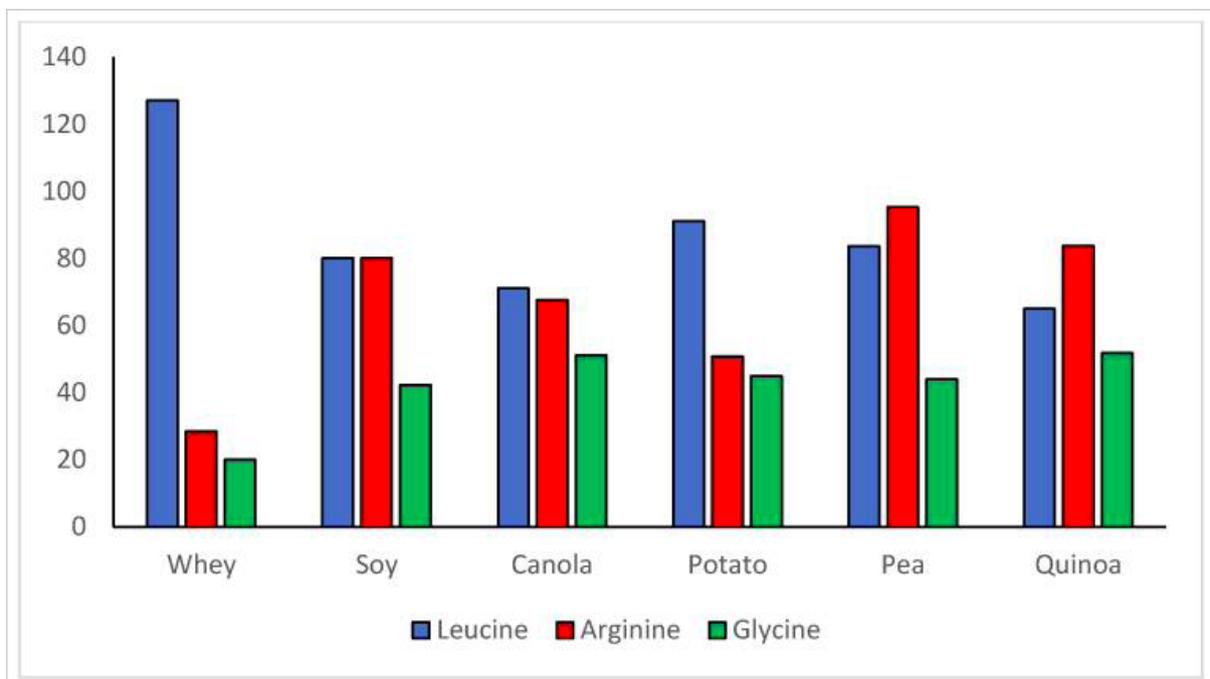


Fig. 15 : Comparaisons des concentrations de leucine et de certains acides aminés (mg/g de protéine) : lactosérum versus les 5 protéines végétales de plus haute qualité. *Soy = soja, Canola = colza, Potato = pomme de terre, Pea = pois*

Source : Hertzler SR, Lieblein-Boff JC, Weiler M, Allgeier C. Plant Proteins: Assessing Their Nutritional Quality and Effects on Health and Physical Function. *Nutrients*. 2020 Nov 30;12(12):3704. doi: 10.3390/nu12123704. PMID: 33266120; PMCID: PMC7760812.

Leur teneur en leucine est également un facteur limitant. Comme nous pouvons le voir sur ce graphique (**figure 15**), la whey demeure la protéine qui a le taux de leucine le plus élevé, comparé aux protéines végétales. Ainsi, la whey peut être considérée comme étant plus efficace que les protéines végétales. Cependant, il est à noter que, malgré une teneur moindre en leucine, les protéines végétales ont globalement une teneur plus élevée en arginine et en glycine que les protéines lactières. Ce large panel d'AA peut conférer aux sportifs des avantages supplémentaires, c'est pourquoi il peut être judicieux de les consommer.

Les protéines de soja : à risque ?

Parmi les protéines végétales, les protéines de soja en poudre ont connu un véritable essor avec l'engouement pour une alimentation plus éco-responsable ces dernières années. D'abord prisés par les sportifs désireux de se tourner vers des protéines végétales, elle a peu à peu été mise de côté au profit des protéines de pois et de riz, car sujette à de nombreuses controverses (augmentation du taux d'hormones féminines chez les hommes, risques de cancers du sein chez les femmes...).

Protéines de soja et effets sur les hormones sexuelles ?

C'est la question qui s'est posée au cours de l'étude de Kalman D et al. (2007) [91]. Elle comprenait 20 sujets suivis sur 12 semaines et supplémentés par 50g/jour de l'une des quatre sources de protéines : le concentré de soja, l'isolat de soja, le mélange isolat de soja + whey et de la whey uniquement, le tout accompagné d'un entraînement de résistance. Au terme de cette étude, il apparaît que le taux d'oestradiol a effectivement été augmenté suite à l'apport en protéines de soja (comparativement à la whey) mais que le taux de testostérone sérique n'est pas diminué par la prise de ces protéines. Le gain de masse maigre a été sensiblement comparable pour tous les groupes suite à la supplémentation. Cette affirmation est en accord avec les affirmations de Reed et al. 2021 basé sur des résultats d'analyses s'étendant de 2010 à 2020 et publiés sur Pubmed. [92].

Cependant, ces résultats sont en désaccord avec ceux de Dillingham et al. (2005) [93] selon lesquelles, sur les 35 hommes testés pendant 57 jours, l'isolat de soja a contribué à la diminution des concentrations sériques de testostérone d'environ 10% comparativement à la whey. Le taux d'oestrogènes a, par ailleurs, bien été augmenté par la consommation de protéines de soja.

Ainsi, même si les résultats divergent, l'hypothèse d'une diminution du taux de testostérone associé à une augmentation avérée du taux d'oestrogènes chez les hommes consommant des protéines de soja sur une longue durée provoquent un rapport testostérone/oestrogène à la baisse alors qu'un gain de masse maigre est favorisé par une augmentation de ce rapport (expliquant alors que les hommes, par une concentration plus élevée en testostérone sérique, auront plus de facilité à prendre en muscle qu'une femme). La prise de protéines de soja ne serait donc pas pertinente pour les hommes. D'autres part, elle sera également à éviter chez les femmes qui ont des troubles hormonaux par principe de précaution.

Soja et dangers pour la santé ?

Au fil des années, de nombreuses rumeurs sur l'effet possiblement délétère du soja sur la santé et notamment des femmes ménopausées ont vu le jour en raison de leur richesse en isoflavones. Les isoflavones sont des phytoestrogènes : elles ont une structure similaire aux oestrogènes et peuvent se lier aux mêmes récepteurs (ER α et ER β), avec une liaison préférentielle sur les ER β [94]. Malgré les inquiétudes grandissantes sur les isoflavones et leurs impacts sur la santé (cancer du sein, ...), et notamment sur les femmes ménopausées, l'Autorité Européenne de Sécurité des Aliments (EFSA) a affirmé que les isoflavones n'ont pas d'effet négatif sur le sein, la thyroïde et l'utérus chez les femmes ménopausées [95].

Intérêts des protéines de soja

Les protéines de soja ont un effet anabolisant moindre que les protéines lactières. Néanmoins, leur richesse en isoflavones leur permet d'avoir des propriétés anti-oxydantes [96]

et anti-cataboliques supérieurs à la protéine de lait. Une consommation excessive est à éviter, pour écarter tout risque hormonal, mais elles peuvent parfaitement s'intégrer dans le cadre d'une alimentation variée avec diverses sources de protéines.

Protéines de riz et de pois : des protéines végétales aussi anabolisantes que les protéines lactières ?

Selon Joy et al. (2013) [97], la consommation de 48 g/jour d'isolat de protéines de riz permettrait un gain de force similaire à une consommation de 48g/jour d'isolat de whey. Cette similarité peut s'expliquer par la dose, supérieure aux 20-40g de whey conseillé habituellement et permettant d'atteindre un quota suffisant en leucine pour induire des effets bénéfiques sur l'anabolisme.

Babault et al. [98] ont quant à eux soumis les sportifs à une même dose (soit 25 g, 2 fois/jour) de protéines de pois d'une part et de protéines de lactosérum d'autre part. Au terme de l'étude, les résultats montrent que l'épaisseur du biceps a été augmentée de façon similaire dans les deux groupes. L'hypothèse selon laquelle la protéine de pois permettrait un gain de force et de muscle similaire à la protéine de lactosérum a été validée plus tard en 2019 par l'étude de Banaszek et al. (avec une dose de 48g/jour de protéines de pois vs.48g de protéines de lactosérum) [99].

Ainsi, parmi les protéines végétales, les protéines de pois et de riz semblent avoir un effet anabolique similaire aux protéines lactières sans engendrer de fluctuations hormonales comme le soja. Il est toutefois conseillé d'augmenter la dose de protéine végétale prise par rapport à celle de la protéine lactière afin d'optimiser la prise de masse musculaire.

• Les gainers

Les gainers sont des mélanges de protéines (20 à 30 %) et de glucides (70 à 80%). Contrairement aux idées reçues, certains gainers ne sont pas plus caloriques que les autres protéines en poudre de type whey, caséine... et ne vont donc pas, à doses égales, faire prendre plus de poids que de la whey par exemple puisque l'apport calorique reste similaire. D'autres en revanche, sont enrichis en calories (en général en augmentant la part de glucides/100g) afin de faciliter la prise de masse chez les pratiquants qui ont du mal à prendre du poids. Ils constituent une alternative facile d'usage, pratique et rapide et peuvent être consommés plusieurs fois par jour pour augmenter l'apport protéique et glucidique quotidien chez ceux dont l'appétit peine à venir.



Nous avons vu précédemment l'intérêt d'associer les protéines aux glucides lorsqu'ils sont pris autour de l'entraînement. L'usage de gainers peut aussi être utile en ces termes : pris avant l'entraînement, ils permettent de diminuer la fatigue dû à la diminution des réserves en glycogène, et après l'entraînement, ce mélange permettra de soutenir la réponse anabolique et de reconstruire rapidement les stocks en glycogène. Il faut cependant se méfier de ces gainers car, pris à outrance, leur usage favoriserait la prise de masse grasse (d'après l'étude de Kreider et al. 1996 [100]) et pour cause, les gainers sont constitués en majorité de glucides. Si le sportif ne fait pas attention à ses apports en glucides journaliers,

cela se traduit par une hausse d'apports caloriques totaux, qui ne comprend pas forcément une hausse d'apport en protéines : il en résulte une augmentation de poids avec possiblement une accumulation de masse grasse sur le long terme si les apports surpassent largement les dépenses caloriques totales.

Au niveau hormonal, Chandler et al. (1994) [101] ont démontrés que suite à un entraînement accompagné d'un apport en protéines et en glucides pré-entraînement et 2h après :

- Les taux d'insuline et d'hormones de croissance étaient significativement plus élevés (↑anabolisme),
- Les taux de testostérone étaient plus faibles (frein à l'anabolisme).

Dans cette même lignée, celle de Kraemer et al. (1985) [102] compare la consommation d'un mélange de protéines et de glucides sous la forme de gainers divers à celle d'un placebo, pris autour de l'entraînement (2h avant et immédiatement après l'entraînement) et évalue les fluctuations hormonales correspondantes. Les résultats sont les suivants :

- Le glucose et l'insuline étaient significativement plus élevés qu'en période sans supplémentation et ce, à 30 min post ingestion du mélange protéines + glucides, → **Rétablissement des stocks en glycogène et diminution de la fatigue pendant l'entraînement** (cf. Partie II-b).
- Les concentrations en hormone de croissance et en IGF-1 étaient maximales juste après l'entraînement, → **Accroît l'anabolisme musculaire** (cf. Partie I)
- Au niveau de la testostérone, sous supplémentation, sa concentration plasmatique était significativement plus élevée juste après l'entraînement (tout comme en présence de placebo), mais a ensuite diminué jusqu'à atteindre un seuil en dessous de celui habituellement rencontré en période de repos. → **Effet anabolisant et anti-catabolique juste après l'entraînement, mais diminution de cet effet en période de repos prolongé.**

Malgré cela, le bilan reste en faveur de l'anabolisme musculaire lors de la prise de gainer, mais attention toutefois à l'apport calorique global sous peine d'augmenter la masse grasse.

NB : d'autres protéines en poudre existent (protéines de viande, protéines d'oeuf, mélanges de protéines d'oeuf et de caséine, mélanges de whey et de caséine) mais ils ne seront pas abordés au cours de cette thèse car assez peu utilisés par les pratiquants de musculation de nos jours (onéreux, goût désagréable en bouche, difficilement trouvable, ...).

→ Les protéines en poudre : laquelle choisir ?



Le consommateur a donc largement le choix lorsqu'il s'agit de suppléments protéinés, mais qu'en est-il de leur efficacité les unes par rapport aux autres ? Lesquelles sont à privilégier ?

- **Whey fromagère vs. Whey native**

La whey native, par son processus de fabrication, est plus riche en AA et notamment en leucine que la whey fromagère. L'étude de H.P. Cintineo et al. (2018) [21] compare la consommation de :

- 20 g de concentré de whey fromagère (teneur en leucine : 2,7g)
- 20 g de whey native (teneur en leucine : 2,2g)
- 20g de lait (teneur en leucine : 2g)

Les doses ont été ingérées à deux reprises : une première fois juste après la séance (env. 30 min) et une 2e fois 2h après la séance d'entraînement de musculation. Les résultats montrent que les concentrations sanguines en AA étaient plus élevées dans les deux whey comparativement au lait et que leur taux de synthèse protéique était également plus élevé. Aussi, la synthèse protéique demeurait significative jusqu'à 3h post absorption pour la whey fromagère et jusqu'à 5h pour la whey laitière. Malgré la plus longue durée d'action des whey natives, le taux de synthèse n'était pas plus élevé pour les whey laitières que pour les whey fromagères.

Ainsi la consommation de whey fromagère peut tout à fait suffire pour une synthèse protéique (à condition d'en consommer de manière plus fréquente) mais pour les sportifs plus regardant sur la qualité des produits et qui souhaitent que le temps d'action soit plus conséquent, mieux vaut se tourner vers la whey native.

1 à 3h post absorption :

Taux de synthèse protéique sous whey fromagère = Taux de synthèse protéique sous whey laitière

Jusqu'à 5h post absorption :

Taux de synthèse protéique sous whey fromagère < Taux de synthèse protéique sous whey laitière

- **Whey vs. Caséine micellaire**

Dans l'étude de Crib et al. (2006) [103], la consommation d'une dose de 45 g de whey / jour a permis à des sportifs de force de gagner près de 5 kg de masse musculaire après 10 semaines d'entraînement régulier. Cette prise de masse musculaire serait, d'après les résultats, 5 fois supérieure à ceux obtenus suite à l'ingestion de supplémentation à base de caséine seule.

Prise de masse maigre sous whey > Prise de masse maigre sous caséine micellaire

Cependant, nous avons vu précédemment que la caséine était la protéine en poudre la plus adaptée à la collation nocturne du fait de sa digestion lente.

Effets de la whey en collation nocturne (max 6h) < Effets de la caséine micellaire en collation nocturne

- **Whey vs. Soja**

Volek et al. (2013) [104] ont réalisé une étude dont la durée permet de voir les effets sur le long terme d'une supplémentation quotidienne à base de whey et de la comparer à la supplémentation à base de protéines de soja. Suite à 9 mois de suivi et un entraînement régulier, le groupe ayant obtenu un gain de masse musculaire supérieur (soit + 3,6 kg) est le groupe qui a régulièrement consommé de la whey. Le groupe supplémenté en protéines de soja a obtenu un gain de masse musculaire de 2,6 kg.

Prise de masse maigre sous whey > Prise de masse maigre sous protéines de soja

- **Whey vs. Soja vs. Caséine micellaire**

Lorsque l'on compare l'efficacité de la whey à la caséine micellaire et à la protéine de soja, il apparaît que la protéine de lactosérum permet une synthèse protéique globale (musculaire, hépatique et autre) supérieure à la protéine de soja et à la caséine. En effet, la whey permet d'obtenir un taux de synthèse protéique $\approx 122\%$ supérieure à la caséine micellaire et $\approx 31\%$ supérieure à celle de soja (qui est aussi supérieur au taux de la caséine) [105]. Même si ces données concernent la synthèse protéique totale, les résultats peuvent aussi témoigner d'une synthèse de protéines musculaires supérieur lors de la prise de whey que pour les autres protéines car la whey permet d'avoir un bilan azoté supérieur à la protéine de soja et de caséine.

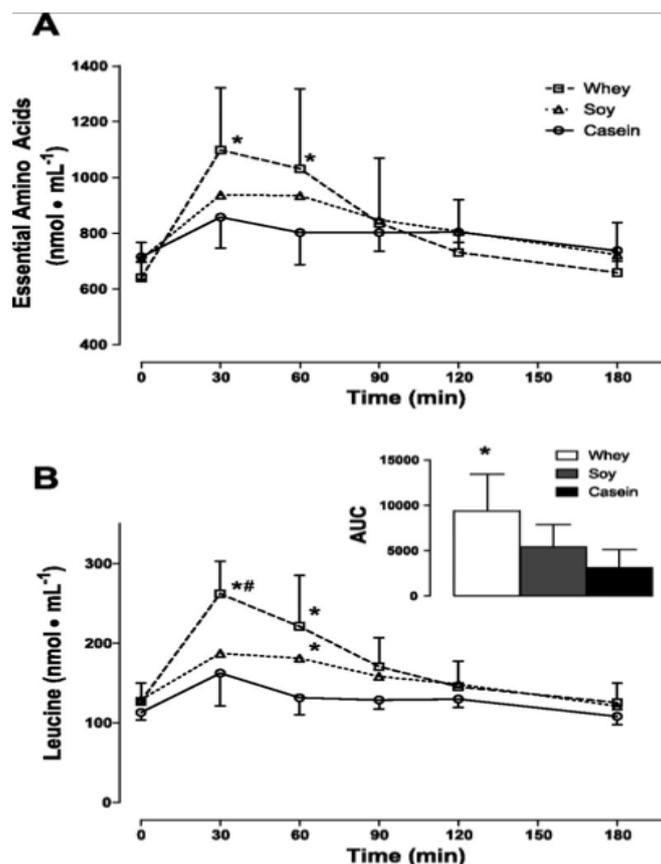


Fig. 16 : Concentration sanguine des acides aminés essentiels (A) et de la leucine (B) après ingestion d'hydrolysate de lactosérum, de caséine ou de protéines de soja. Encart : aire sous la courbe (AUC) de la leucine. *Significativement différent de la caséine ($P < 0,05$). #Significativement différent du soja ($P < 0,05$). Toutes les valeurs sont des moyennes \pm SD ; $n = 6$ par groupe. Certaines barres d'erreur ont été omises pour plus de clarté.

Source : Tang, J.E.; Moore, D.R.; Kujbida, G.W.; Tarnopolsky, 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. *J. Appl. Physiol.* 2009, 107, 987–992.

Comme nous pouvons le voir à travers la **figure 16**, la consommation de protéines, que cela soit sous forme de whey, de protéine de soja ou de caséine micellaire entraîne une augmentation de la concentration plasmatique d'AAE (Whey > Soja > Caséine) et de leucine (Whey > Soja > Caséine). Il est à noter que la whey offre des résultats bien supérieurs comparativement aux deux autres protéines, dont les effets sont à peu près similaires au niveau de la concentration en AA. Or, nous savons que bien souvent, le facteur limitant une synthèse protéique conséquent est le manque d'AAE et notamment de leucine. Ainsi, cet apport plasmatique en AA est bénéfique pour la synthèse protéique, surtout au niveau musculaire.

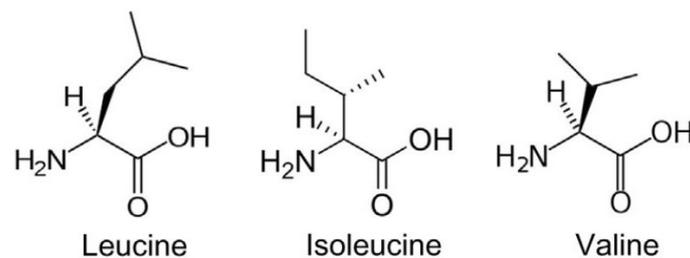
Cependant, on peut voir que sur la durée, la protéine de soja, et encore plus la caséine micellaire, demeurent des protéines de choix pour maintenir un taux constant en AAE et notamment de leucine.

Prise de masse maigre sous whey > Prise de masse maigre sous protéines de soja > Prise de masse maigre sous caséine

Malgré un effet indéniablement supérieur de la whey sur les autres protéines concernant l'hypertrophie musculaire, une consommation variée semble être un choix plus approprié dans la mesure où chaque protéine va apporter des bénéfices au niveau du temps d'absorption, des AA en présence, des vitamines, Les protéines à digestion rapide (type isolat et hydrolysats de whey, isolats et hydrolysats de soja et +/- hydrolysats de caséine) seront à privilégier en post-entraînement afin d'apporter rapidement aux muscles les AA dont ils ont besoin et les protéines à digestion lente (protéines végétales classiques, caséine micellaire) seront à privilégier en prise nocturne ou bien en collation entre deux plus gros repas. Pour les végétaliens, même si les protéines végétales offrent un gain de masse inférieur aux protéines lactières, elles constituent tout de même un bon apport en protéines et peuvent aisément être prise à plus hautes doses pour atteindre des effets similaires à une dose classique (20-40g) de whey, en faisant attention toutefois à l'apport glucidique et aux calories correspondants.

b) Les AA utiles à la prise de masse musculaire

1. Les BCAA



Comme nous l'avons vu précédemment (partie I et II), une consommation d'AAE après un exercice de résistance va permettre un bilan protéique positif. En effet, la synthèse protéique sera plus importante que lorsque l'entraînement sera fait à jeun [106]. Les BCAA (ou Branched-Chain Amino Acids) sont des acides aminés ramifiés. Ils sont au nombre de 3 : la valine, la leucine et l'isoleucine. La leucine, notamment, a été mise en avant dans de nombreuses études comme ayant une action pro-anabolisante et anti-catabolique (*partie I*) mais son action sur le long terme est améliorée par la présence de Valine et d'Isoleucine. Ce sont des AAE donc disponibles uniquement via un apport exogène (alimentation ou compléments alimentaires). Valine et Leucine sont tous deux issus du Pyruvate, relativement abondants dans l'organisme, alors que l'Isoleucine est issue de la Thréonine, en quantité moindre dans l'organisme ce qui explique que le rapport Val-Leu-Isoleu demeure à 1,6-2,2-1,0 à l'état physiologique [19]. Les BCAA constituent près du tiers des protéines musculaires [34], ce qui font d'eux un allié majeur chez les sportifs de force. Au cours des précédentes parties, nous avons pu démontrer l'importance d'un apport suffisant en leucine pour la prise de masse musculaire, la prise de ces suppléments paraît donc pertinente pour les sportifs qui peinent à soutenir leur besoin en AAE. Les BCAA sont vendus pour : le maintien ou l'augmentation de la synthèse protéique (même en cas d'inactivité temporaire ou de surentraînement), être une source d'énergie pendant l'entraînement, diminuer la fatigue musculaire et améliorer la récupération. Mais qu'en est-il réellement ?

Pourquoi les BCAA ?

Lors d'exercices intenses s'installant sur la durée tel qu'un exercice de musculation réalisé plusieurs fois par semaine, le pool des AA et notamment des BCAA tend à diminuer. Ainsi, Mero et al. (1997) [107] ont rapporté une diminution de près de 20% des stocks en BCAA

lors de la pratique régulière de musculation sous 5 semaines et ce, malgré un apport en protéines maintenu à 1,26 g de protéines/kg. Selon l'étude de Karlsson (2004) [108], un entraînement de 90 min réduirait de près de 20% les concentrations plasmatiques en leucine, 13% en valine et 25% en isoleucine. Par ailleurs, lorsqu'une dose de protéines est ingérée, seuls 10% des AA sont destinés à la synthèse *de novo* de protéines musculaires. Le reste est réquisitionné entre autres par le foie et par l'intestin en vue de produire des protéines locales, de l'énergie [109, 110] et à la production de neurotransmetteurs. Or, il est intéressant de noter que lors de la consommation de BCAA, qui sont des AA à chaîne ramifiée, la portion catabolisée par le foie est bien moindre en raison d'une teneur plus faible en aminotransférase à chaîne ramifiée dans les hépatocytes [111]. Ils sont alors préférentiellement métabolisés dans les muscles squelettiques. Un apport en BCAA permettrait de **diminuer de près de 30% le catabolisme musculaire** par augmentation de la quantité d'AAE disponible pour la synthèse protéique [112]. Selon Karlsson (2004) [108], la **riposte anabolique** via une supplémentation en BCAA avant, pendant et après l'entraînement serait **3,5 fois supérieure** comparé à la prise de placebo. Si cet effet est particulièrement bénéfique chez le sportif de force, les effets sont moins pertinents chez un individu sédentaire puisque, pour eux, la synthèse de protéines musculaires induite par l'hyperaminoacidémie est transitoire. En effet, elle s'active pendant 2 à 3 heures maximum avant de revenir à son niveau basal et ce, malgré un apport régulier en AA [84]. Ce phénomène de "muscle plein" explique pourquoi en l'absence d'exercice la synthèse protéique ne peut être assez conséquente pour induire un gain significatif de masse musculaire. A l'inverse, l'exercice va permettre d'augmenter l'usage de ces AA au service de l'hypertrophie musculaire. Ainsi, il paraît pertinent d'augmenter sa consommation en AA, et particulièrement de BCAA, lors de la pratique de musculation afin d'optimiser cette synthèse protéique.

A quelle dose ?

Les BCAA sont généralement vendus dans le commerce sous forme de BCAA 2:1:1 (Leucine: Isoleucine:Valine) : c'est à dire à que dans une dose, il y a autant d'isoleucine que de valine mais que la quantité de leucine représente le double de la quantité des deux autres acides aminés. Il existe aussi d'autres types de BCAA dont les 9:1:1, mais leurs effets réels sont assez discutés du fait qu'une quantité importante de leucine ne serait pas pertinente si les autres AA sont en quantité insuffisante dans l'organisme.

La dose de BCAA à prendre dépend donc du type de BCAA, des préconisations de chaque laboratoire et de l'apport en protéine total du sportif justifiant ou non l'intérêt d'une prise de BCAA. Néanmoins, de manière générale, on préconise un apport de **6g de BCAA/dose**, idéalement pris en pré et intra-entraînement.



Effets des BCAA : sujet à controverse ?

Selon Kraemer (1985) [102], l'apport en BCAA va aider à limiter la dégradation des protéines, augmenter la masse maigre et prévenir la fatigue et au niveau hormonal, cet apport va permettre une augmentation de la concentration en hormone GH et de testostérone en faveur de l'hypertrophie et augmenter la force musculaire.

- Anabolisme musculaire : effets sur la p70s6k :

Nous l'avons vu précédemment, la leucine qui constitue l'un des 3 AA des BCAA a des propriétés pro-anabolique bien établies (*partie II*) mais qu'en est-il des BCAA vendus dans le commerce ?

L'étude de Karlsson (2004) [108] mesure l'impact de l'apport en BCAA sur la phosphorylation de la p70s6k impliqué dans la voie anabolique des protéines musculaires. Un groupe de sujets masculins a été supplémenté par une solution de BCAA pendant et après la séance de musculation, le deuxième par une solution placebo. L'apport en BCAA a permis dans un premier temps d'éviter le turn over des AA pendant la séance. D'autre part, une augmentation du taux de phosphorylation de la p70s6k a été observé, mais uniquement après la séance (dans l'heure qui suit).

En effet, les taux de phosphorylation sur Ser424 et Thr421 (sérine et thréonine) (**figure 17**) utiles à l'activation de la p70s6k sont au même niveau sous placebo et sous BCAA au cours de l'entraînement. Cependant, dans la période de repos, et uniquement dans le groupe BCAA, on constate une augmentation de ce taux de phosphorylation sur Ser424/Thr421 et ce, jusqu'à 2h post-entraînement.

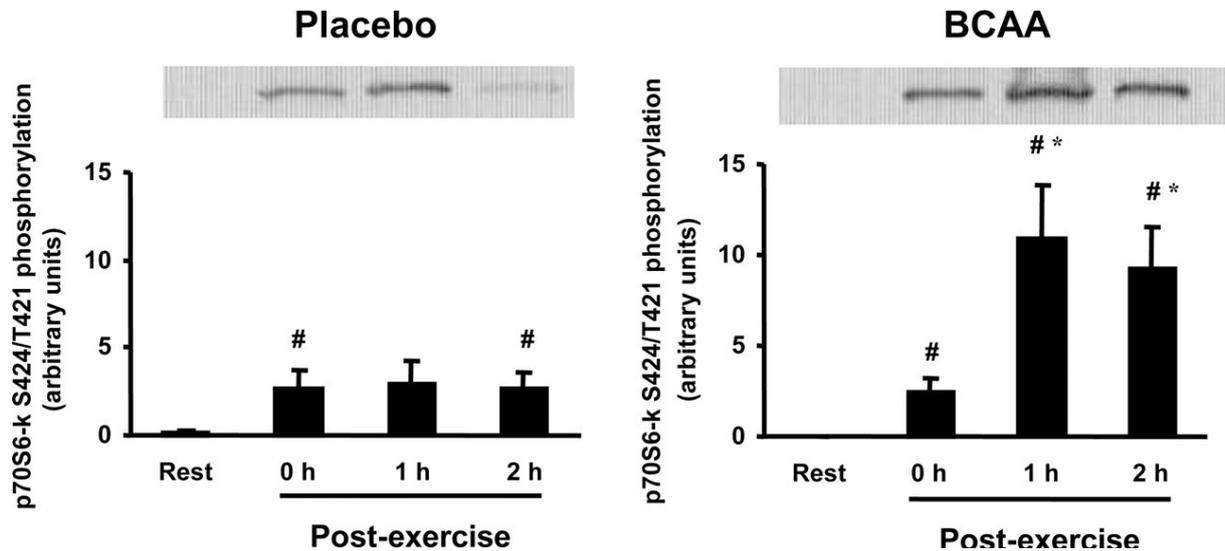


Fig. 17 : Phosphorylation Ser424/Thr421 de la protéine kinase 70-kDa S6 (p70S6k) dans le muscle squelettique au repos et après l'exercice pendant les essais placebo et BCAA. Des immunoblots représentatifs sont présentés (en haut). Les valeurs dans le graphique sont des unités arbitraires (moyennes \pm SE pour 7 sujets). #P < 0,05 vs. repos ; *P < 0,05 pour BCAA vs. placebo.

Source : Karlsson H.K.R., et al. Branched-Chain Amino Acids increase p70s6k phosphorylation in human skeletal muscle after resistance training. *J Apl Physiol.* 2004 287 : E1-E7.

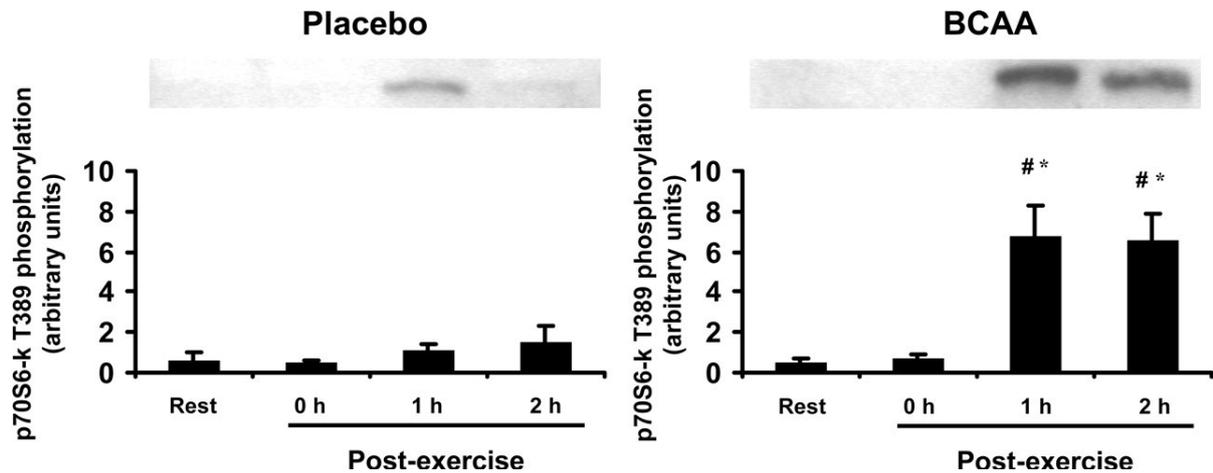


Fig. 18 : Phosphorylation Thr389 de p70S6k dans le muscle squelettique au repos et après l'exercice pendant les essais placebo et BCAA. Des immunoblots représentatifs sont présentés (en haut). Les valeurs dans le graphique sont des unités arbitraires

Source : Karlsson H.K.R., et al. Branched-Chain Amino Acids increase p70s6k phosphorylation in human skeletal muscle after resistance training. *J Appl Physiol.* 2004 287 : E1-E7.

Il en est de même de la phosphorylation de la Thr389 de la p70s6k (**figure 18**).

Ainsi, on peut retenir que des BCAA pris pendant et après l'entraînement vont permettre d'augmenter le taux de phosphorylation de la p70s6k en lien avec la synthèse protéique via le complexe mTORC1. Les BCAA ont donc des propriétés anabolisantes.

- **Augmentation des performances** liés à l'augmentation de la masse musculaire
- **Réduit la fatigue** : les BCAA peuvent être utilisés comme source d'énergie pour la synthèse d'ATP
- **Diminution des douleurs liés à l'entraînement de force :**

L'étude de Van Dusseldorp TA et al. (2018) [113] a été réalisé sur des sportifs confirmés et ayant un apport en protéines d'au moins 1,3g/kg/jour. Le groupe supplémenté a ingéré une dose de 0,22 g/kg/jour de BCAA répartis le matin et le soir. Ce groupe a été comparé à un groupe placebo dont la boisson était constituée de maltodextrine. Au terme de l'étude, aucun gain de force n'a été constaté comparativement au placebo mais une meilleure récupération et une diminution des douleurs musculaires liés à l'entraînement ont été relevées ce qui globalement a permis aux sportifs d'avoir un entraînement suffisamment intense pour provoquer une hypertrophie.

- **Mais... des effets encore à prouver :**

Néanmoins, il est à noter que les résultats divergent quant à la réelle efficacité des BCAA. Même si leur usage par les sportifs demeure, de nombreuses études stipulent que la supplémentation de BCAA n'apporte pas de bénéfices réels dans le cadre d'une alimentation variée et suffisamment riche en protéines (1,6g/kg/jour) [113]. Par exemple, Jackman et al. (2010) [114] n'ont trouvé aucune amélioration de la récupération musculaire ni réduction de courbatures sous 29g de BCAA pris en post-training chez des athlètes. Les résultats peu

concluants de ces études peuvent s'expliquer par le fait que, pour un sportif suffisamment regardant de la qualité de son alimentation et de ses apports en macronutriments (*cf. Partie II*), l'apport nécessaire en BCAA est bien souvent totalement couvert par les apports journaliers. Selon Wolfe RR (2022) [115], la raison pour laquelle la supplémentation en BCAA ne peut augmenter le taux de synthèse protéique réside dans le fait que c'est l'apport global en AAE qui importe et que, bien qu'on augmente la dose de BCAA, les autres AAE constituent un facteur limitant et leur possible faibles concentrations sanguines freineraient le processus de synthèse protéique. Il est à noter également que ces mêmes BCAA se retrouvent déjà dans la composition des protéines en poudre (*cf. Partie III*) souvent consommés par les sportifs pour couvrir leurs besoins en protéines, un apport supplémentaire en BCAA serait donc peu pertinent. Les effets bénéfiques précédemment cités des BCAA ont néanmoins été mis en évidence dans l'étude de Sharp et al. (2010) [116] mais chez des sportifs dont l'apport protéique peinait à atteindre les 0,8g/kg/jour, ce qui n'est pas recommandé pour les sportifs de force réalisant des entraînements à haute intensité. Cette étude nous prouve bien qu'une supplémentation en BCAA n'est réellement nécessaire que pour les sportifs qui peinent à atteindre leurs objectifs nutritionnels quotidiens, notamment en termes de protéines.

AAE et BCAA vs. Protéines en poudre : par quoi se supplémenter pour un gain de masse musculaire optimisé ?

Nous l'avons vu précédemment, les études démontrant les effets positifs de la supplémentation en whey sur la prise de masse sont nombreuses. A l'inverse, celles démontrant la réelle efficacité de la supplémentation en BCAA seuls sur la prise de masse le sont nettement moins.

A titre d'exemple, l'étude de Bird et al. (2006) [117] a été réalisée chez les jeunes hommes non entraînés. Le premier groupe a eu un placebo (maltodextrine) et le deuxième une solution à base d'AAE (6g/jour). La durée de l'étude s'étendait à 12 semaines au cours desquels les sujets se sont entraînés à raison de 2 fois/semaine. Au terme de l'étude, le gain de masse total (muscle et masse graisseuse) a été de 3 kg dans le groupe ayant été supplémenté en solution d'AA. Néanmoins, il apparaît que ces résultats obtenus sont sensiblement similaires à ceux obtenus avec le placebo, mettant alors un point d'interrogation sur la réelle pertinence d'une supplémentation en AAE (dont les BCAA) lors d'entraînements de musculation. Par ailleurs, le fait que les sujets inclus dans l'étude débutent en musculation est une donnée qui a toute son importance car rappelons qu'à durée et entraînements similaires, le gain de masse est supérieur chez les débutants par rapport aux sujets entraînés (*cf. partie I et II*). Pourtant, comme nous l'avons vu dans la *partie II*, la qualité d'une protéine est jugée selon son taux de leucine. Ainsi, même si l'apport en AAE de manière générale ne procure pas l'effet escompté, cela peut être dû au faible apport en leucine que la boisson procure. Ainsi, il serait plus judicieux de comparer les effets d'un apport en AA et d'un apport en protéines lactières ou végétales, mais à dose de leucine constante.

C'est justement l'expérimentation qui a été menée par Mobley et al. (2017) [118]. Dans cette étude, toutes les portions ont été ajustées de telle manière à ce que la quantité totale de leucine soit de 3 g/portion (leucine dans des BCAA, whey concentré, hydrolysate de whey et concentré de protéines de soja) et la portion placebo correspond à un apport en maltodextrine (glucide). Elles ont été consommées à raison de 2 portions / jour. L'étude a été réalisée sur 75 hommes débutants ayant réalisé 3 séances / semaine sur 12 semaines. Au terme de ces 12 semaines, le gain de masse musculaire a été supérieur dans les groupes ayant eu un apport en leucine (leucine et protéines) que dans le placebo (qui a aussi connu un gain de masse musculaire car les apports journaliers étaient atteints). Au total, le gain de force a été similaire dans tous les groupes du fait d'une augmentation de l'apport calorique total journalier (dont protéines et glucides) et

d'un gain d'endurance au fur et à mesure des semaines d'entraînement. Il a aussi été noté une augmentation de la taille des fibres musculaires de type I et II. Cependant, seuls les groupes ayant perçu de la protéine laitière ont connu une augmentation notable du nombre de cellules satellites qui, comme nous l'avons vu dans la partie I, contribuent à l'hypertrophie musculaire. Ces résultats corroborent avec ceux de Olsen et al. (2006) [119] qui ont relevé une augmentation de près de 50% du nombre de cellules satellite chez les sportifs supplémentés à la whey sous 16 semaines, comparativement à un placebo. Ces résultats nous confortent sur l'idée que le point principal lorsqu'il s'agit d'un désir d'hypertrophie est l'apport suffisant en protéines dans la journée. Le supplément le plus complet dans ce domaine semble être la protéine laitière qui permet aussi un apport en BCAA.

Ainsi, les avis sur la réelle pertinence d'une supplémentation en BCAA sont tranchés. Les variabilités concernant la prise alimentaire de chaque sportif, le moment de la prise, le niveau d'entraînement et la fréquence d'entraînement sont autant de variables qui peuvent impacter les résultats. Cependant, les recherches à ce sujet sont toujours d'actualité et intéressent de nombreux chercheurs afin de fournir une réelle conclusion sur les bénéfices (ou non) d'une consommation de BCAA en poudre. Un sportif de force pourra toujours se supplémenter en BCAA si ses apports en protéines ne sont pas suffisants ou s'il désire limiter le catabolisme musculaire mais la prise de BCAA ne sera toutefois pas indispensable pour un gain de masse musculaire significatif. Il est toutefois à noter que l'AA le plus à même de provoquer une synthèse protéique dans les BCAA est la leucine, dont nous avons abordé les bénéfices lors des précédentes parties (*I et II*). Un nouvel AA, qui découle de la leucine est actuellement en cours d'étude : il s'agit de la β -hydroxy- β -méthylbutyrate (HMB) qui serait bénéfique pour la prise de masse musculaire, tout comme la leucine.

2. Le HMB : un AA prometteur

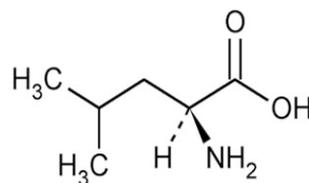


Fig. 19 : Le HMB

De nombreuses études démontrent l'efficacité du β -hydroxy- β -méthylbutyrate (HMB) (**figure 19**) concernant ses capacités à stimuler la synthèse protéique via le complexe mTORC1, augmenter les taux d'hormone de croissance et d'IGF-1 impliqués dans l'hypertrophie et à procurer de l'énergie (biogenèse mitochondriale) [120]. Le HMB est un métabolite de la leucine. La leucine est dans un premier temps métabolisée en acide α -cétoisocaproïque (KIC) par l'aminotransférase 2 des acides aminés à chaîne ramifiée (BCAT2) dans le muscle squelettique. Par la suite, seul 5 à 10% du KIC est converti en HMB dans le foie par l' α -KIC dioxygénase (enzyme cytosolique) [121] (**figure 20**).

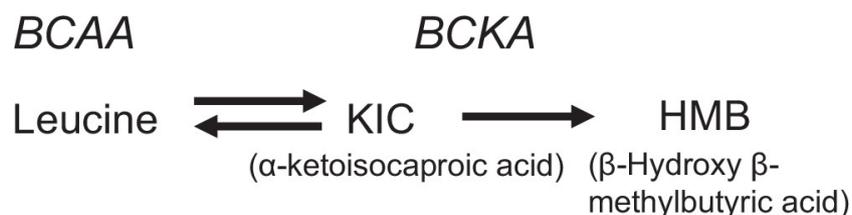


Fig. 20 : Formation du HMB à partir de la leucine

Source : Ten Have GAM, Jansen L, Schooneman MG, Engelen MPKJ, Deutz NEP. Metabolic flux analysis of branched-chain amino and keto acids (BCAA, BCKA) and β -hydroxy β -methylbutyric acid across multiple organs in the pig. Am J Physiol Endocrinol Metab. 2021 Mar 1;320(3):E629-E640. doi: 10.1152/ajpendo.00384.2020. Epub 2021 Feb 1. PMID: 33522397.

Effets et mécanisme d'action

- Selon la Société Internationale de Nutrition Sportive (INSS), le HMB a des effets reconnus dans la **récupération musculaire** en limitant les dégâts causés aux fibres musculaires lors de l'entraînement de force [130].
- Tout comme la leucine, le HMB est considéré comme un **supplément ergogénique** dans la mesure où il va permettre de **stimuler la synthèse protéique et d'augmenter la force musculaire chez l'Homme**. En effet, il exerce son action via le complexe mTORC1 puisqu'il augmente la phosphorylation d'Akt (protéine kinase *cf. partie I*). Les deux composants activent la voie mTORC1 par des processus différents car le HMB n'exerce aucune action sur la Sestrine2 contrairement à la leucine. Les deux AA, pris en suppléments, peuvent donc aisément agir en complémentarité.
- Le HMB peut également agir par une autre voie : celle qui consiste en la phosphorylation de FOXO1 désactivant la MURF1 (protéine en lien avec l'atrophie musculaire) et permet alors de **prévenir l'atrophie musculaire** [121].
- Il a également une **action anabolisante** via la voie des **hormones de croissances GH** et **IGF-1** en élevant leur concentration.
- Le HMB peut aussi **augmenter la teneur en ATP musculaire** (via une augmentation de la biogenèse mitochondriale)
- **Augmente les concentrations en BCAA** dans le plasma sanguin et les muscles. En effet, grâce à l'usage de leucine marquée, Holecek et al. (2019) [123] ont pu constater une diminution du taux d'oxydation de la leucine sous supplémentation en HMB. Cela s'explique par le fait que, puisqu'il était présent à des concentrations suffisantes, la synthèse de novo via la dégradation de la leucine en KIC a été ralentie.
- Il a été démontré à de nombreuses reprises que le HMB détient également des propriétés **anti-cataboliques** en inhibant les voies ubiquitine-protéasome, lysosomales et d'autophagie (voies de protéolyse, *cf. partie I*). En effet, il peut diminuer l'expression et l'activité des enzymes du protéasome, diminuer la régulation positive des caspases et diminuer l'apoptose des cellules musculaires [122].

Toxicité / Effets indésirables

A l'heure actuelle, aucun effet indésirable important n'a été mis en évidence concernant la supplémentation en HMB.

Pour qui ?

Le HMB est particulièrement indiqué chez les débutants en musculation ou bien les athlètes soumis temporairement à un surmenage physique (entraînements fréquents et plus intenses) [123]. Ses effets peuvent toutefois être diminués chez les athlètes avancés du fait de la suppression de la protéolyse induite par l'adaptation à l'entraînement.

A quelle dose ?

De manière optimale, la cure d'HMB exercera pleinement ses effets après 2 semaines minimum de prise et un entraînement régulier. On peut généralement retrouver le HMB sous forme de sel de calcium (dans sa forme la plus couramment vendue) ou bien sous forme acide libre (mais dont les effets réels sont encore en cours de recherche).



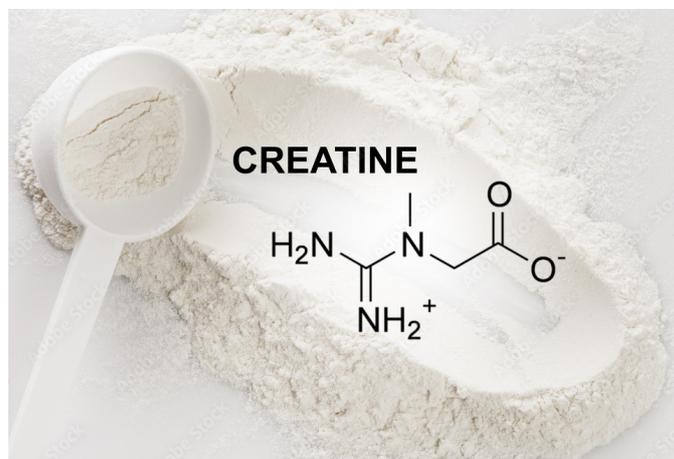
La concentration plasmatique efficace a été établie à **50 $\mu\text{mol.L}^{-1}$** . Plus généralement, les recommandations journalières sont de l'ordre de **3g de HMB/jour**, ce qui correspond à un apport d'environ 60 g de leucine [122]. Selon Wilkinson et al. (2013), [124] la supplémentation en HMB peut être pertinente car une consommation de 2,42g de HMB élève les taux plasmatiques à 400 μM alors qu'une consommation de 3,42g de leucine ne permettrait d'avoir des taux plasmatiques de HMB que de 10 μM . Cette étude a d'ailleurs permis de démontrer que 2,42g d'HMB permet d'obtenir un gain de masse musculaire significatif par augmentation de la synthèse protéique et inhibition du catabolisme. Selon GAM et al. (2021) [125], la leucine met environ 60 min à atteindre le plasma et le HMB se retrouve à des concentrations plasmatiques correspondant à environ 0,06% de l'apport en leucine dans les 180 min post absorption du bol alimentaire. Ainsi, le HMB issu de la métabolisation de la leucine ne produirait que peu d'effets du fait de sa faible concentration aux doses usuelles chez un sportif, d'où l'intérêt de la supplémentation.

Limites

Dans l'étude de Deutz et al. (2013) [126], la prise de HMB au cours d'une période de 20 jours d'alitement chez les personnes âgées ont permis de limiter significativement la perte de masse musculaire liée à l'inactivité physique. Néanmoins, l'étude d'Hocelek et al. (2019) [123] révèle que malgré une supplémentation en HMB, une absence d'activité physique n'entraînera pas d'augmentation de la masse musculaire (rien n'est affirmé cependant concernant la perte de masse musculaire) ce qui prouve bien que dans le cadre d'une recherche de gain en masse musculaire, la prise de HMB doit indéniablement s'accompagner d'une pratique sportive régulière de type musculation. D'autres études décrivent la supplémentation en HMB comme étant peu pertinente : ainsi dans l'étude de Ransone et al. (2003) [127] réalisée chez des sportifs entraînés (footballers) aucun gain de masse musculaire ni gain de force n'a été rapporté après 1 mois de supplémentation en HMB. Des résultats similaires ont été trouvés par Hoffman et al. (2003) [128] chez des sportifs de force, ce qui prouve bien que la supplémentation en HMB doit encore faire l'objet de recherches supplémentaires avant d'être proclamé en tant que supplément réellement anabolisant.

3. La créatine comme booster de performances

Qu'est ce que c'est ?



Nous l'avons vu précédemment, l'exercice de force est très énergivore et le processus de synthèse protéique qui s'ensuit l'est tout autant. Il en résulte une baisse drastique des taux d'ATP, qui lors d'un entraînement peut entraver les performances du sportif et peut freiner sa récupération musculaire en post-entraînement. La créatine fait partie des suppléments booster d'adénosine triphosphate (ATP). Sa renommée en tant que supplément pour la prise de muscles et de force n'est plus à prouver. Les premiers effets de la créatine furent étudiés dès les années 1920 par Benedict et al. (1923) [129]. La créatine se retrouve dans nos muscles à hauteur de 125 mmol de créatine/kg de muscle sec et peut également, sur le même principe, se retrouver dans la viande rouge (~1g de créatine pour un 250g de viande rouge). Elle peut être produite dans les reins et le foie à partir d'AA tels que l'arginine, la glycine et la méthionine ou bien via la phosphocréatine mais peut aussi être prise en tant que complément alimentaire sous forme de créatine monohydrate. Longtemps décriée comme étant un produit dopant, la créatine n'a finalement pas été inscrite par le Comité International Olympique dans la liste des produits dopants. La créatine est à l'heure actuelle l'un des suppléments ergogéniques scientifiquement prouvé les plus plébiscités par les sportifs de force et pour cause, selon Kreider (2003) [130], 70% des études scientifiques comparées dans sa revue témoignent de l'amélioration des performances du sportif sous créatine.

Intérêts d'une supplémentation en créatine chez le sportif de force

- Augmentation de la force :

Selon les analyses de Kreider (2003) [130] basées sur la littérature scientifique, une augmentation des performances de l'ordre de 10 à 15% peuvent être observés sous créatine, autant pour le haut du corps que pour le bas du corps. La phosphocréatine délivre un phosphate à l'ADP pour former de l'ATP et de la créatine. L'ATP devient alors une source d'énergie directement utilisée pour l'effort lors d'un exercice de musculation. Ainsi, lors de cet effort, la concentration en créatine augmente tandis que celle de phosphocréatine diminue. Lorsque le passage ADP → ATP ne peut se faire, on assiste à une accumulation d'ADP dans les muscles, ce qui limite la force de contraction musculaire et impacte l'intensité de la séance par manque d'énergie (moins d'ATP). Lors d'un effort intense, les réserves en phosphocréatine s'épuisent plus rapidement que

celles d'ATP. De plus, nous avons vu précédemment que les séances de musculation étaient très énergivores. De ce fait, la fatigue peut vite survenir au cours d'un effort intense, limitant le sportif dans la bonne exécution de son entraînement. Ainsi, on pourrait penser qu'une simple supplémentation en phosphocréatine pourrait shunter ce problème mais il s'avère que cette dernière est détruite lors de la digestion. Une supplémentation en créatine permet alors de contourner le problème car il est aisé de passer de la forme créatine → phosphocréatine via un apport en créatine et en ATP (**figure 21**). L'apport exogène en créatine permet alors de reconstituer des stocks plus abondants en phosphocréatine lors de la période de repos et celui-ci pourra aisément fournir de l'ATP lors de l'entraînement.

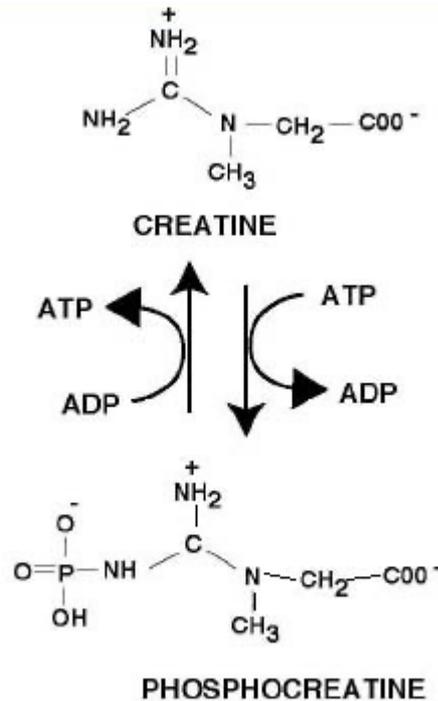


Figure 21 : Le passage de la créatine en phosphocréatine et inversement

Source : <https://www1.udel.edu/chem/C465/senior/fall00/Performance1/phosphocreatine.htm.html>

- **Fournit de l'ATP au cours de l'entraînement permettant de stimuler la synthèse protéique malgré l'effort :**

La prise de créatine peut aider à augmenter la disponibilité d'ATP aux muscles et peut également maintenir des taux suffisants au cours de l'entraînement, limitant ainsi l'épuisement du sportif au cours de la séance. Les capacités physiques s'en trouvent améliorées ce qui permet, *in fine*, une prise de masse musculaire plus importante [131]. Selon Casei et al. (1996) [132], lors d'un exercice énergivore, la perte d'ATP peut être diminuée de 30% sous supplémentation en créatine et ce, même s'il dure dans le temps. D'autre part, la créatine permet également de diminuer la vitesse de dégradation de l'ATP lorsque l'effort est récurrent : c'est comme si le muscle économisait son énergie en pleine séance sans que la force en soit diminuée. Elle a aussi la capacité d'accélérer la synthèse d'ATP au cours de l'effort.

- **La créatine attire l'eau dans les cellules musculaires, permettant cette apparence de "muscle pompé", plus volumineux :**

La supplémentation en créatine augmente la teneur en eau intracellulaire dans le but de faciliter la production de facteurs de régulation myogénique ou MRF en vue de stimuler

la différenciation des cellules satellites [133]. Visuellement, cela donne l'impression d'un muscle plus visible (car gorgé en eau) et volumineux.

- **Augmente la sécrétion d'hormones anabolisantes :**
L'IGF-1 (Insulin-like Growth Factor-1) et le MGF (Mechano Growth Factor) : action sur les cellules souches musculaires et le complexe mTORC1 et la voie impliquant Akt.
- **Favorise le stockage cellulaire du glycogène** (réserves d'énergie, *cf. partie II*) :
La créatine permet d'avoir une régulation positive sur l'expression des gènes codant pour des protéines qui augmentent la synthèse de glycogène (réserves énergétiques pour les muscles, *cf. partie II*). Par ailleurs, elle diminue également l'expression des gènes impliqués dans la synthèse de protéines liés à la dégradation des stocks en glycogène [134].
- **Effet anti-oxydant : protège la cellule de sa dégradation :**
Il a été démontré qu'une supplémentation en créatine permet de prévenir le stress oxydatif et de calmer l'inflammation engendrée par la séance de musculation sur les fibres musculaires [135]. En effet, la créatine a des effets directs sur la dégradation des espèces réactives de l'oxygène.
- **Recommandé chez les végétaliens et végétariens :**
Nous l'avons vu précédemment, la créatine peut également se retrouver dans la viande rouge mais chez les végétaliens et végétariens, cet apport ne peut se faire. Il a été démontré par de nombreuses études que la supplémentation en créatine était d'autant plus judicieuse auprès des végétaliens [131] et des végétariens [134], que chez les omnivores car leur taux de créatine à l'état physiologique est assez faible. Ainsi, il apparaît qu'une telle supplémentation permettrait des augmentations de concentrations intramusculaires plus significatives que chez les carnivores.

Sur le court terme (< 2 semaines), les effets de la créatine se traduisent surtout via une **augmentation de la force** et une meilleure **endurance musculaire**. En effet, suite à l'analyse de 22 études différentes par Rawson et al. [136] en 2003, il a été noté que la force musculaire peut être améliorée de 8% et l'endurance de 14% sous créatine par rapport à un placebo lors d'un entraînement de force.

Sur le long terme (>2 semaines), il a été constaté de **meilleures adaptations à des entraînements plus fréquents et intenses**, permettant alors d'augmenter les volumes d'entraînements sans augmenter la fatigue du sportif. Ces effets sont dus à l'augmentation des concentrations en phosphocréatine intramusculaires permettant de fournir la force nécessaire aux fibres de type II adaptés à la musculation. Il en résulte de meilleures performances lors des entraînements et sur une durée plus étendue qu'en l'absence de supplémentation. [131]. Les meilleures performances mènent, *in fine*, à un gain de masse musculaire plus important.

Dose et moment de prise

A quelle dose ?

A l'heure actuelle, seul le **monohydrate de créatine** permet les effets bénéfiques précédemment cités. Le choix de la créatine devra par ailleurs se tourner vers le label **Creapure®**, de meilleure qualité que la créatine monohydrate classique.

La consommation de créatine comme supplément peut être réalisée via 2 méthodes différentes :

1. **Introduire une dose de charge puis poursuivre avec une dose d'entretien** : Cette notion de phase de charge a été proposée pour la première fois par Harris et al. en 1992 [137]. Elle consiste en la consommation d'une dose s'élevant à **0,3g/kg/jour** ou bien **20 g/jour réparties en 4 doses de 5g par jour** pendant **5 à 7 jours** consécutifs avant de poursuivre avec une dose d'entretien à **0,03 g/kg/jour** soit environs **2 à 5 g/jour**. D'après leur étude, une telle supplémentation permettrait une augmentation de près de 50% de la concentration intramusculaire totale en créatine et 20 à 40% sous la forme phosphocréatine. Selon Kreider et al. (2017) [138], l'augmentation serait plutôt de l'ordre de 20 à 40% mais produirait des effets ergogéniques immédiats.
2. **Commencer directement avec une dose d'entretien** : quelques années après les découvertes d'Harris, Hultman et al. (1996) [139] ont démontré qu'une dose d'entretien seule était tout autant efficace que la méthode impliquant une dose de charge. Tout comme la méthode précédente, cette dose d'entretien s'élève à **0,03 g/kg/dose/jour** ce qui correspond à environ **2 à 5 g/jour**.

A ce jour, il a été clairement établi qu'une phase de charge n'est pas nécessaire pour observer les effets ergogéniques de la créatine. Néanmoins, cela constitue un bon moyen pour élever rapidement les niveaux de phosphocréatine intramusculaires et peut aussi correspondre aux consommateurs les moins répondeurs (*cf. limites de la créatine*).

Par ailleurs, il est à noter que la créatine peut être prise sur une période plus ou moins longue, sans risquer de désensibilisation. En effet, Bembien et al. (2001) [140] ont observé des améliorations chez des footballeurs dans la force du 1RM au développé couché et au back squat et ce, malgré une supplémentation en créatine s'étendant sur une période de 9 semaines. De même que Chilibeck (2017) [134] a mis en avant des résultats similaires concernant une étude s'étendant sur 52 semaines.

A quel moment ?

Le C_{max} (pic de concentration maximale) est atteint dans les 2h post absorption de la créatine et peut rester à des taux élevés jusqu'à 4h après [137]. Malgré une durée de rémanence relativement élevée, on peut se poser la question du moment le plus opportun pour la prise de créatine en vue de profiter pleinement des effets précédemment cités.

→ Les jours avec entraînement

Les analyses de Candow et al. (2022) [141] nous montrent que la prise de créatine **autour de l'entraînement** (5g avant et 5g après) permet d'obtenir des concentrations intramusculaires en créatine supérieures (24%) à la prise de 5g le matin à jeun et de 5g le soir au coucher (7%). Cela peut s'expliquer par le mode de transport de la créatine. La créatine rentre dans les muscles contre un gradient de concentration à l'aide d'un co-transport avec 2 Na^+ et 1 Cl^- pour chaque molécule de créatine transportée. Lors de l'exercice, c'est la pompe Na^+/K^+ du muscle squelettique, soumis à une activité maximale, qui permet l'accumulation de sodium dans les muscles ce qui accroît les échanges Na^+/Cr . Ainsi, l'exercice peut contribuer à augmenter les concentrations intramusculaires de créatine via ce mécanisme. Sur ce principe, il apparaît que la prise idéale de la créatine se situera autour de l'entraînement. De nombreuses études postulent en faveur de cette prise péri-entraînement pour booster la prise de masse musculaire, mais les études qui comparent réellement une prise avant ou bien après l'entraînement sont plus rares et ce sujet mérite de plus amples recherches. Quelques études existent cependant, comme celle de Candow et al. (2015) [142] qui conclut que la prise de

créatine en **post-entraînement** permet un gain de masse musculaire supérieur à la prise avant l'entraînement, même si tous deux démontrent un gain significativement élevé par rapport à la prise de placebo. Par ailleurs, Delavier (2019) [39] préconise d'**éviter la prise de créatine juste avant l'entraînement** car au vu des propriétés hypoglycémiantes de la créatine, cela risque d'accentuer la diminution de la glycémie déjà provoquée par l'effort physique et d'augmenter la fatigue au cours de l'entraînement.

→ Les jours sans entraînement

Les avis des études divergent quant à la réelle pertinence d'une prise de créatine pendant les jours de repos. Néanmoins, pour les sportifs qui ne veulent pas arrêter leur supplémentation les jours où ils ne pratiquent pas d'activité physique, le timing de prise sera bien moins complexe : elle pourra se faire à n'importe quel moment de la journée.

Créatine en prise seule ?

La prise concomitante de protéines et/ou de glucides avec la dose de créatine pourrait en améliorer l'absorption, mais la littérature actuelle dénote de nombreuses discordances à ce sujet, ne nous permettant pas de statuer là-dessus [141]. Dans les faits, la prise de créatine seule a déjà, à de multiples reprises, démontré ses effets bénéfiques quant à la prise de masse musculaire et le gain de force. Il n'y a, par ailleurs, pas de diminution d'effets lorsque cette prise est concomitante à la prise de protéines ou de glucides mais il n'y a pas non plus de bénéfices supérieurs clairement établis.

Il existe aussi sur le marché des formulations caféine + créatine à prendre avant l'entraînement pour booster ses performances et son énergie, mais la littérature actuelle dénote que même s'il n'y a pas de réelle interactions dans la prise concomitante de caféine et de créatine, la caféine pourrait quelque peu modifier les effets ergogéniques de la créatine. En outre, il paraît plus judicieux de les prendre à distance : la prise de caféine étant idéale en pré-entraînement et la créatine en post-entraînement.

Des répondeurs et des non répondeurs : les limites de la créatine

La créatine peut correspondre à un large panel de consommateurs : du jeune adulte aux personnes âgées, hommes et femmes, débutants ou athlètes confirmés. En effet, des améliorations de la force à hauteur de 20 à 25% sous 10 semaines de supplémentation ont été rapportés chez des femmes qui ont débuté en musculation en même temps que leur cure de créatine [143]. Aussi, la méta-analyse de Chilibeck et al. (2017) [134] regroupant 721 sujets âgés de 57 à 70 ans supplémentés en créatine pendant 7 à 52 semaines et exerçant 2 à 3 séances par semaine démontre, en tout lieu, un gain de masse musculaire ainsi que le gain de force sous créatine dans cette population.

Néanmoins, une élévation concomitante de la créatine et de la phosphocréatine de minimum 20 millimoles par kg de muscle sec est nécessaire pour que la créatine exerce pleinement ses effets. Tous les individus ne réagissent pas tous à la même vitesse pour élever ce taux, ce qui peut causer des effets disparates d'un individu à l'autre vis-à-vis de la supplémentation en créatine et peut expliquer les divergences des résultats des études réalisées dans un laps de temps inférieur à une semaine. En effet, la plupart des personnes parviennent à cette valeur dans les 5 jours de supplémentation en créatine mais certains individus prennent plus de temps à atteindre les 20 mmol/kg. Les femmes ainsi que les personnes âgées semblent être globalement moins répondeurs à la créatine et il a été rapporté que 25 à 30% des

consommateurs demeurent insensible à la créatine malgré une supplémentation de plus de 5 jours. Selon Syrotuik et al. (2004) [144], plus il y a de fibres de type II (force) dans les muscles des personnes supplémentés (vis à vis du type I impliqué dans l'endurance), plus la réponse face à la supplémentation en créatine sera forte. Ainsi, il apparaît que les sportifs dont les muscles sont déjà bien développés (niveau avancé) seront plus répondeurs que les débutants en musculation et que les sportifs d'endurance répondent généralement moins bien que les sportifs de force.

Effets indésirables

Il n'y a aucune preuve tangible d'effets indésirables significatifs établis à ce jour concernant la supplémentation en créatine malgré des rumeurs d'atteinte hépatique et rénale. [134]. Selon l'ISSN, la créatine jouit d'une sécurité d'utilisation tout en ayant de réels effets bénéfiques pour le sportif de force, faisant de ce complément alimentaire un allié de choix pour la prise de masse musculaire.

c) L'essentiel de la micronutrition chez le sportif de force

Nous l'avons vu précédemment, les apports en macronutriments sont à surveiller chez le sportif de force pour veiller à une prise de masse musculaire maîtrisée et optimale. Cependant, les apports en micronutriments demeurent tout aussi importants pour les personnes pratiquant de la musculation afin de faire face à l'effort intense, la dégradation puis réparation tissulaire et pour compenser les pertes liées à la transpiration. Cette supplémentation paraît tout autant pertinente que la majorité de la population est, généralement, carencée en termes de micronutriments.

1. Oméga 3



Comme nous avons pu le voir au cours du chapitre sur les lipides (*cf. partie II*), au sein de la population générale, le rapport oméga 6/oméga 3 se situe aux alentours des 20/1 alors que si l'on suit les recommandations de l'Anses, ce rapport devrait tourner autour des 5/1 (omega6/omega3). Ainsi, pour le sportif de force, il faudra d'une part veiller à limiter la consommation d'oméga 6 en parallèle d'une augmentation de la consommation en oméga 3. Les oméga 3 se retrouvent dans certaines graisses végétales et les graisses animales, surtout provenant des poissons dits "gras" (saumon, thon, sardines, ...). La supplémentation en oméga 3, souvent retrouvés sous la forme de capsules dans le marché, peut paraître pertinente si l'alimentation seule ne suffit plus à maintenir un rapport oméga 6/3 de 5/1.

Intérêts de la supplémentation en oméga 3 chez un sportif de force

- Antioxydant :

Les oméga 3 exercent une action dans la **diminution de l'inflammation** par augmentation de la production d'IL 1 et 6 et inhibition de la voie des COX, du stress oxydant et dans la réparation tissulaire en plus d'avoir de nombreuses vertus pour la santé (cardiovasculaire, immunitaire, dermatologique, ...). Inflammation et stress oxydant sont en corrélation étroite : ils s'enduisent mutuellement (car l'inflammation libère des espèces réactives telles que le peroxyde d'hydrogène, le superoxyde, ...) et lors d'une séance de musculation, on peut assister à une augmentation de la dégradation tissulaire mais aussi du stress oxydant.

Lorsque les muscles se contractent, ils produisent des ROS (espèces réactives de l'oxygène) via l'activation de la xanthine oxydase endothéliale, la fuite d'électrons au niveau des mitochondries, le processus inflammatoire et l'auto-oxydation des catécholamines. [145] Afin de contrer cela, les antioxydants cellulaires comme le glutathion sont recrutés, mais s'amenuisent grandement au fur et à mesure de l'entraînement. La pratique régulière d'exercice de musculation permet via une adaptation progressive une augmentation des mécanismes de défense face au stress oxydant mais parfois, cela ne suffit pas et les ROS s'accumulent au cours de l'effort. Il en résulte une diminution de l'oxydation des protéines et des lipides à l'origine d'une diminution de la force et de l'apparition d'une fatigue précoce altérant les performances du sportif [146]. La prise d'antioxydants permet de suppléer les fonctions naturelles de défense de l'organisme et peut être particulièrement bénéfique chez les sportifs de force, d'où l'intérêt des oméga 3.

- Gain de masse musculaire et de force :

Smith et al. ont mis en évidence en 2011 [147] une **augmentation significative de la synthèse de protéines** musculaires chez des sujets jeunes et âgés après avoir eu une supplémentation de 4 g d'oméga 3/jour pendant 8 semaines. Dans la même lignée, leur étude de 2015 [148] témoigne d'un gain de masse musculaire de 3,6% et de force de 4% suite à la supplémentation de 3,36 g d'oméga 3 / jour pendant 6 mois chez des personnes âgées. Ces résultats, en plus d'apporter des preuves dans la pertinence d'une supplémentation en oméga 3 chez le pratiquant de musculation, nous montre qu'elle peut être réalisée sur le long terme sans risquer de désensibilisation et qu'elle peut s'appliquer autant chez les sujets jeunes qu'âgés. Cependant, les mécanismes sous-jacents à l'augmentation de la synthèse protéique par l'apport en oméga 3 sont peu clairs. Cet effet serait possiblement lié au complexe mTORC1 et à la p70s6k [149]. D'autres part, les oméga 3 peuvent contribuer à l'**amélioration des performances sportives** dans la mesure où ils peuvent moduler la perméabilité des membranes cellulaires, faciliter l'absorption des AA et augmenter la sensibilité à l'insuline via sa régulation à la hausse des transporteurs GLUT4 [146]. Selon Tipton et al. (1999) [150], la prise d'oméga 3 permet également de **potentialiser la réponse aux stimuli anaboliques**. L'étude basée sur des cultures cellulaires par Kamolrat en 2013 [151] alloue les effets pro-anabolisants de l'oméga 3 à la présence d'EPA (augmentation de la synthèse protéique de 25% sous EPA seul par rapport au DHA seul). Par ailleurs, cette étude révèle également les propriétés anti-cataboliques de l'EPA par inhibition de la voie NF- κ B (qui, par son action sur MURFF-1 marque les protéines pour les faire dégrader) et suppression de la voie protéasome-ubiquitine. Les effets réels du DHA vis à vis du catabolisme musculaire sont à ce jour peu étudiés et méritent de plus amples recherches.

- Récupération musculaire :

Selon Jouris et al. (2011) [152], la prise d'oméga 3 à raison de 3g/jour a démontré ses effets dans la **récupération musculaire et la diminution des douleurs post-entraînement**. Des résultats qui corroborent avec ceux de Lembke et al. publiés en 2014 [153]. Or, une meilleure récupération peut mener à une meilleure réparation tissulaire, une amélioration de la synthèse protéique et une augmentation des performances.

Quelle dose ?

La dose la plus pertinente sera à évaluer en fonction des apports totaux lipidiques et de la portion à allouer aux oméga 6 par rapport aux oméga 3 (*cf. partie II pour de plus amples détails*). Néanmoins, on préconisera globalement, si l'on suit les nombreuses études à ce sujet, une supplémentation en oméga 3 à hauteur de **3g/jour**. De façon plus précise, Thielecke et al. (2020) [154] ont démontré des effets bénéfiques d'une supplémentation en oméga 3 pour des doses minimales d'1,8 g/jour chez les débutants et 2g/jour chez les athlètes. Le choix de l'oméga 3 sera préférentiellement celui qui détient les taux d'EPA et de DHA les plus élevés.

Limites

La supplémentation en oméga 3 est **contre-indiquée chez les patients sous traitement anticoagulant et antiplaquettaire** dans la mesure où une prise excessive d'oméga 3 peut altérer le fonctionnement normal de l'agrégation plaquettaire. En effet, l'EPA et le DHA contenu dans les oméga 3 favorisent la production de thromboxane A3 prothrombique (stimule l'agrégation plaquettaire) [155].

2. La vitamine D

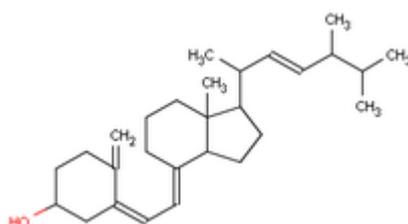


Fig. 22 : La vitamine D

Connue pour ses vertus au niveau osseux, la vitamine D peut notamment être pertinente pour le sportif de force. En effet, des recherches récentes montrent des effets de la vitamine D dans la **croissance des muscles squelettiques, la composante anti-inflammatoire et la récupération des blessures**. Ainsi, ce complément alimentaire chez le sportif peut être envisagé, d'autant plus que la déficience en vitamine D est répandue dans la population générale et notamment chez les sportifs s'entraînant en intérieur comme dans le cas de la pratique de musculation. Le diagnostic d'une **insuffisance en vitamine D** est posé dès lors que les **taux sériques** sont compris entre **[20-30] ng/mL** ou **[50-75] nmol/L** [156]. Chez les sportifs de force, cette déficience peut être à l'origine d'une diminution de la force musculaire, d'un ralentissement de la récupération musculaire et d'une diminution de la santé osseuse, cruciale lors de la pratique de musculation.

Définition

La vitamine D est une prohormone (**figure 22**) qui joue également le rôle de micronutriment dont la supplémentation via un apport exogène peut être possible. Il existe 2 formes de vitamine D : le cholécalciférol ou vitamine D3, et l'ergocalciférol ou vitamine D2. La vitamine D3 peut être produite par la peau suite à une exposition solaire (via l'UVB) tandis



que la vitamine D2 se retrouve exclusivement dans l'alimentation (œufs, poisson, ...). Malgré cela, la vitamine D contenue dans l'alimentation est souvent en quantité insuffisante vis à vis des besoins journaliers. D'après Organ et al. (2013) [165] le processus de digestion diminue de près de 50% son efficacité. La vitamine D issue de l'exposition solaire et de l'apport exogène doit ensuite être convertie en 25-hydroxyvitamine D3 (calcidiol) par le CYP2R1 dans le foie puis en 1,25-dihydroxyvitamine D3 (calcitriol) par le CYP27B1 dans les reins. Elle devient alors biologiquement active et entre dans la circulation sanguine via la BPD (vitamin D Binding Protein) pour rejoindre les organes cibles où elle se liera à son récepteur (VDR). Il existe des récepteurs de type nucléaire et de type membranaire. Enfin, c'est le CYP3A4 qui s'occupe de la destruction du calcitriol. Les enzymes précédemment cités sont **dépendantes de la concentration en magnésium** : une quantité optimale de magnésium, corrélée à un apport suffisant en vitamine D vont permettre d'optimiser ses effets. Ainsi, la supplémentation en magnésium peut potentialiser les effets de la vitamine D en plus de ses capacités à diminuer la fatigue musculaire [157].

Intérêts de la supplémentation en vitamine D chez un sportif de force

- **Effets positifs sur la santé osseuse et le remodelage osseux** : une bonne structure osseuse est bénéfique pour le sportif de force afin de limiter les fractures lors du port de charges lourdes mais aussi pour supporter l'augmentation du poids.
- **Augmente l'activité de l'IGF-1 par induction de l'expression de son récepteur, ce qui a des répercussions sur l'hypertrophie** (cf. partie I). [159].
- **Prolifération et différenciation des cellules musculaires** : la fixation de la vitamine D sur son récepteur peut entraîner des effets génomiques induisant une transcription et une traduction de gènes cibles [159]. Elle permet aussi de diminuer le risque d'apoptose de ces mêmes cellules [156].
- **Augmente la force de contraction musculaire** : la liaison du calcitriol sur son récepteur membranaire renforce l'interaction myosine-actine dans le sarcomère [160, 161, 162]. Par ailleurs, le calcitriol se lie à son récepteur (VDR), qui dès lors entre en interaction avec le récepteur X des rétinoïdes (RXR). Le complexe calcitriol-VDR-RXR est transféré au noyau où il se lie à la VDRE (Element de Réponse à la Vitamine D) : la transcription des gènes est alors activée [156]. Cette voie génomique permet alors d'activer la prolifération, la différenciation des cellules en cellules du muscle squelettique (via le MYOD1) [163] et de diminuer l'entrée en apoptose [164]. Le tout a pour effet principal d'augmenter le diamètre des fibres musculaires menant à une hypertrophie et notamment les fibres de type II recrutés lors de sports de force. A titre d'exemple, l'étude de D. Wyon et al. (2018) [165] démontre qu'une supplémentation unique de 150 000 UI de vitamine D sur 22 athlètes de judo permet un gain de force musculaire significatif dès 8 jours. On peut supposer que les effets seront allouables aux sportifs de force.

- **Augmente la synthèse de protéines musculaires et la concentration en ATP intramusculaire** [166].
- **Accélère la récupération après un effort musculaire intense et prévient la dégénérescence musculaire** [159, 167].

Malgré cela, les études dénotant une absence d'effets de la supplémentation en vitamine D chez les athlètes subsistent. Ainsi, Close et al. (2013) [168] témoignent d'une absence d'amélioration des performances sportives sous supplémentation en vitamine D par rapport à un placebo. Dans la même lignée, Carswell et al. (2018) [169] n'ont trouvé aucune amélioration au regard de la force musculaire sur les 967 jeunes militaires mis en étude. Même si les effets positifs sur les performances sportives ont été prouvés par le biais de quelques recherches, dans bien d'autres études aucune preuve réelle d'amélioration significative a été démontrée. Ces divergences de résultats peuvent s'expliquer par le fait que des effets significatifs n'ont été perçus que chez les sportifs dont les taux initiaux en vitamine D étaient insuffisants (de l'ordre de 30 ng/ml) [170]. En effet, à des taux sériques avoisinant les 40-50 ng/ml, l'organisme utilise la totalité de la vitamine D au service des besoins métaboliques immédiats et prioritaires. Ce n'est qu'une fois ce seuil dépassé qu'elle interagit avec les cellules du muscle squelettique.

Quelle dose ?

La RNP (Référence nutritionnelle pour la population) est de 15 microgrammes par jour pour les adultes en France. (ANSES)), basé sur les exigences de l'IOM, a été établi à **600 UI/jour chez les moins de 70 ans** et à **800 UI/jour chez les plus de 70 ans** mais selon l'Endocrinology Society, ces taux sont insuffisants et mériteraient d'être élevés à **1500-2200 UI/jour** en plus d'une exposition solaire quotidienne [171, 172]. Même si les besoins de l'athlète en vitamine D s'avèrent équivalents à ceux d'un sédentaire, l'essai clinique de Carlberg (2019) [173] démontre que malgré une prise de près de 7 000 UI/jour chez 70 sujets sportifs, l'augmentation des performances n'a eu lieu que pour certains exercices. Par contre, Ogan et al. (2013) [157] stipulent que pour un athlète pratiquant de la musculation, le schéma idéal serait une supplémentation de 5000 UI/j pendant 8 jours suivi de doses d'entretien de 1000 à 2000 UI/j de vitamine D, suivant l'exposition solaire. Il en demeure qu'il n'y a pas de consensus réellement établi concernant les doses et la méthode à adopter. Les études concernant le dosage optimal de la supplémentation en vitamine D chez le sportif sont à ce jour insuffisantes et mériteraient de plus amples recherches.

Toxicité

Selon l'IOM (Institute Of Medicine), la toxicité de la vitamine D s'établit à des concentrations de l'ordre de **150 ng/mL** [159] soit environ **4000 UI/j**. L'Endocrinology Society affirme que la dose maximale se situerait plutôt aux alentours des **10 000 UI/jour** pour un athlète de force. Bien que des limites maximales ont été établies, peu de preuves à ce jour témoignent d'une intoxication directement liée à un surdosage en vitamine D. Dans les faits, les effets de la toxicité de la vitamine D sont surtout liées à l'hypercalcémie réactionnelle : pourvoyeur d'anorexie, de mictions fréquentes, d'une soif excessive, de nausées, vomissements, parfois même allant jusqu'à l'altération de l'état mental et d'insuffisance mentale. Ainsi, la supplémentation en vitamine D doit se faire suite à des analyses sanguines témoignant d'une véritable déficience et encadrée par un professionnel de santé.

Pourtant, selon Holick et al. (2005) [174], une seule exposition de 5 à 15 min entre 10 à 15h sans protection solaire (qui limiterait l'absorption des UVB) fournirait chez un individu

ayant la peau claire 10 000 à 20 000 UI, ce qui suffit largement aux besoins précédemment énoncés et prouve qu'il n'y a pas de réelle intoxication à la supplémentation en vitamine D. Or, le constat d'une population en carence en vitamine D est bien là, surtout pour les sportifs de force s'entraînant en intérieur. De plus, une simple protection solaire à indice SPF 15 diminuerait à elle seule 99% de l'absorption de la vitamine D. Sur ces faits, il paraît pertinent de se supplémenter en vitamine D, particulièrement en plein hiver, là où le soleil se fait plus rare dans certaines régions.

Les effets bénéfiques d'une telle supplémentation sur la croissance musculaire a été prouvé par un nombre assez conséquent d'études scientifiques mais les celles portant sur le gain de force musculaire sous vitamine D se font plus rares. Du fait de la divergence d'opinions à ce sujet, de nouvelles recherches sur la pertinence d'une prise exogène de vitamine D quotidiennement chez le sportif de musculation sont nécessaires.

3. Le magnésium

Définition et sources de magnésium



Le magnésium (Mg) est un minéral essentiel qui peut s'avérer utile pour un sportif de force. A l'état physiologique, et en l'absence de carences, il est présent dans le corps humain à un taux avoisinant les 25 g. On le retrouve dans les os (env. 50%), les cellules et les organes (49%) et dans la circulation sanguine (1%) [175]. Lors de l'effort, le Mg entre dans la circulation pour être transporté vers les muscles et le cerveau.

L'alimentation constitue une source importante de magnésium. On en retrouve en abondance dans les noix, les graines, les fruits, les légumes, les céréales complètes.

Voici une liste non exhaustive d'aliments à forte teneur en magnésium :

Aliment	Teneur en magnésium (/100g d'aliment)
Amande	258 mg
Noix du Brésil	370 mg
Banane	27 mg
Epinards	93 mg
Haricots secs	164 mg
Riz brun	124 mg
Avoine complète	125 mg
Chocolat noir	206 mg
Cacao en poudre (sans sucre ni ajouts)	376 mg

Source : <https://fdc.nal.usda.gov>

Selon les **RNP**, les quantités de magnésium à consommer sont de l'ordre de **380 mg chez l'Homme et 300 mg chez la femme**. Ces besoins peuvent toutefois être supérieurs chez les sportifs car la sueur et les urines contribuent à une perte importante de magnésium. Ainsi, les sportifs sont plus soumis à la carence en magnésium que les individus sédentaires, justifiant alors la pertinence de la supplémentation.

Intérêts de la supplémentation en magnésium chez un sportif de force

- **Régule la contraction et la relaxation musculaire** [176] :
Il se trouve dans l'organisme à l'état d'ion Mg^{2+} , qui est capable de se lier à l'ATP et former le complexe Mg-ATP. Ce complexe sert, entre autres, à la contraction musculaire lors d'un effort physique et à fournir de l'énergie lors de l'effort.
- **Retarde la fatigue musculaire** :
Intervient dans le métabolisme du glucose. Le Mg est impliqué dans le métabolisme du glucose et permet, par ce biais, de diminuer la fatigue au cours de l'effort. Nous l'avons vu au cours de la partie précédente, le glucose est un véritable carburant au cours de l'effort et fournit au sportif l'énergie nécessaire au bon déroulement de son entraînement. Le lactate est issu du glucose via la glycolyse et peut parvenir au foie pour redonner du glucose via le cycle de Cori. Son accumulation est associée à une fatigue musculaire précoce en lien avec une acidose sans que l'on puisse prouver une relation de cause à effet. L'étude de Chen et al. (2014) [186] évalue, entre autres, la teneur en glucose et en lactate intramusculaire au cours de l'effort et en période de repos chez des rats supplémentés soit par une solution contenant du sulfate de magnésium (90mg/kg), soit une solution saline 30 min avant l'effort. Les rats ont été soumis à 60 min de tapis roulant à la vitesse 20 m/min.
Les résultats sont les suivants :

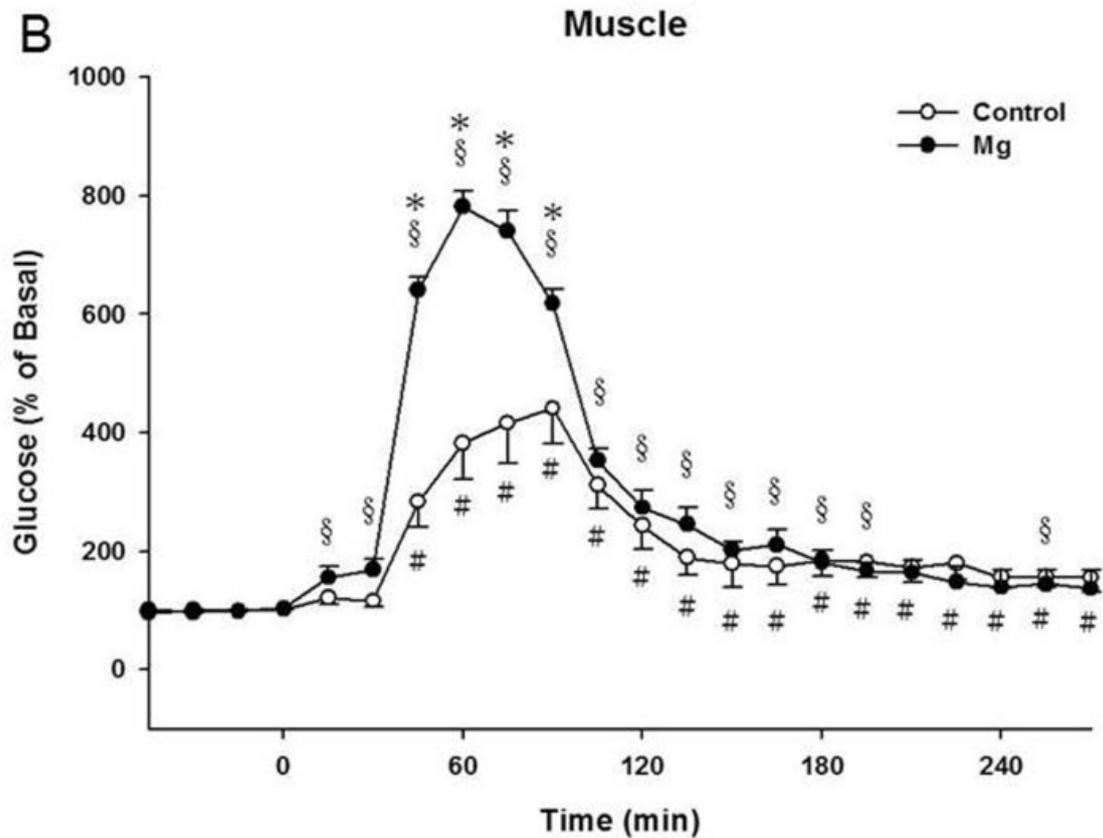


Fig. 23 : Effet du Mg sur les concentrations de glucose dans le muscle

Source : Chen HY, Cheng FC, Pan HC, Hsu JC, Wang MF. Magnesium enhances exercise performance via increasing glucose availability in the blood, muscle, and brain during exercise. PLoS One. 2014 Jan 20;9(1):e85486. doi: 10.1371/journal.pone.0085486. PMID: 24465574; PMCID: PMC3896381.

Selon la **figure 23** :

Dans le groupe “solution saline = control” :

- Augmentation du taux de glucose intramusculaire de 350% par rapport à l'état basal après 60 min d'effort

Dans le groupe “Magnésium” :

- Augmentation du taux de glucose intramusculaire de 790% par rapport à l'état basal après 60 min d'effort
- L'augmentation du taux de glucose intramusculaire est ici accélérée par rapport au groupe placebo

En période de repos (>120min), les taux se rejoignent dans les deux groupes, pour atteindre 200% de glucose intramusculaire par rapport à l'état basal.

Ainsi, l'apport en magnésium a permis d'augmenter la quantité de glucose disponible pour l'effort physique.

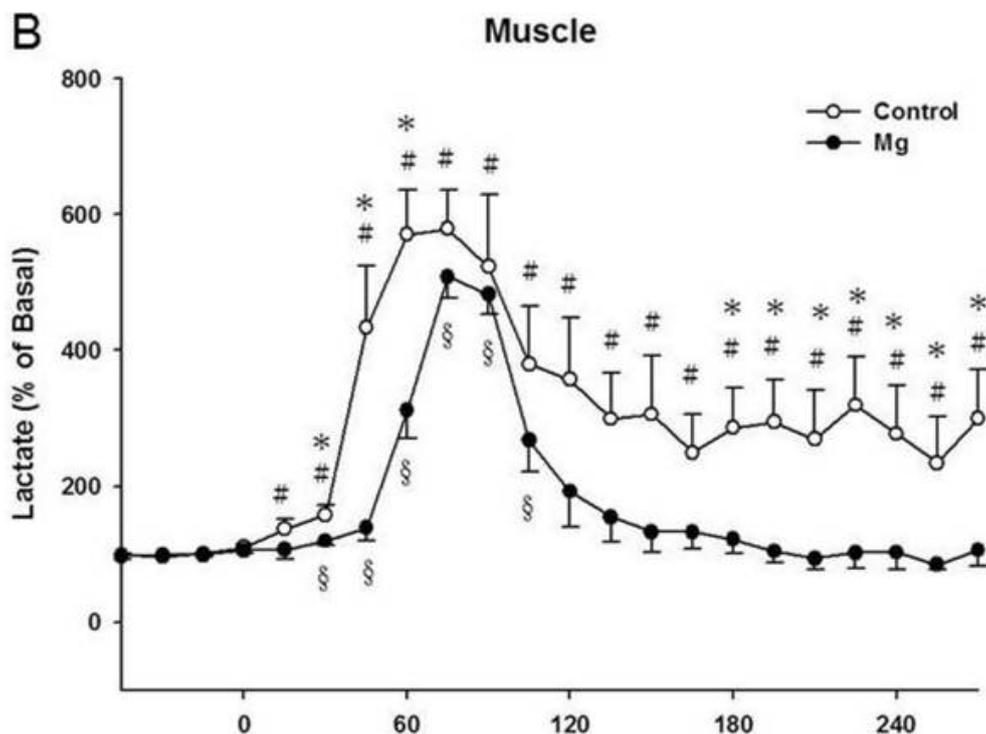


Fig. 24 : Effet du Mg sur les concentrations de lactate dans le muscle

Source : Chen HY, Cheng FC, Pan HC, Hsu JC, Wang MF. Magnesium enhances exercise performance via increasing glucose availability in the blood, muscle, and brain during exercise. PLoS One. 2014 Jan 20;9(1):e85486. doi: 10.1371/journal.pone.0085486. PMID: 24465574; PMCID: PMC3896381.

Selon la **figure 24** :

Dans le groupe “solution saline = control” :

- Augmentation du taux de lactate intramusculaire de 550% par rapport à l'état basal après 60 min d'effort

Dans le groupe “Magnésium” :

- Augmentation du taux de lactate intramusculaire de 300% par rapport à l'état basal après 60 min d'effort
- L'augmentation du taux de lactate intramusculaire est ici retardée par rapport au groupe placebo

En période de repos (>120min), on constate que le taux de lactate intramusculaire diminue rapidement dans le groupe supplémenté en Mg (180% par rapport à l'état basal) alors que pour le groupe placebo, les taux de lactate peinent à diminuer et restent plus élevés qu'avant l'effort (380% par rapport à l'état basal).

Lors de l'exercice physique, le glucose agit comme un carburant pour les muscles afin de fournir la force nécessaire au sportif. Le glycogène constitue les réserves musculaires en glucose, mais comme nous l'avons vu précédemment (partie II), en l'absence d'une nutrition adéquate, ces réserves s'épuisent rapidement. Le glycogène hépatique et musculaire prend alors la relève, mais lorsque les ressources s'épuisent à nouveau, la fatigue apparaît, limitant le sportif dans son entraînement. Le Mg permet d'augmenter l'expression de GLUT 4 mais peut aussi, via son action sur l'insuline, augmenter le taux de transport de glucose par GLUT 4 [178]. De plus, il retarde l'accumulation intramusculaire de lactate lors de l'entraînement, qui est à l'origine de la fatigabilité précoce des muscles. En période de repos, la présence de Mg semble faire nettement

diminuer les taux de lactate comme nous l'avons vu sur le graphique précédent. Ainsi, le magnésium peut induire une **récupération plus rapide**, ce qui est bénéfique pour le sportif de force qui s'entraîne régulièrement dans la même semaine.

- **Potentiale les effets de la vitamine D** (cf. III - D - 2. Vitamine D)
- **Augmente les performances musculaires et de la force (par diminution de la fatigue)** [176, 177, 179]. Par exemple, dans l'étude de Brilla et al. (1992) [180], les participants ont été soumis à 7 semaines d'entraînement de musculation et ont été supplémentés soit en magnésium, soit en placebo. Au terme de l'étude, le gain de force (quadriceps) a été signalé dans les deux groupes, mais il a été supérieur dans le groupe supplémenté en Mg (+28%) par rapport au placebo (+9%).
- **Peut diminuer les besoins en oxygène des muscles au cours de l'effort** ce qui diminue la fatigabilité musculaire [176]
- **Réduit les crampes ?** Des hypothèses ont été avancées concernant la capacité du magnésium à diminuer les risques de crampes. Une hypothèse qui a été vérifiée pour les crampes auxquelles les femmes enceintes peuvent être sujettes, mais concernant celles possiblement engendrés par la pratique de musculation, les données sont divergentes et ne permettent pas de conclure de l'efficacité réelle d'une supplémentation en magnésium sur les crampes liés aux sports de force [181].

Même si les effets du magnésium en font un supplément à ne pas négliger chez le sportif de force, il existe toutefois des études démontrant l'inefficacité de la supplémentation en magnésium telle que celle de Moslehi et al. (2013) [182] qui, malgré une supplémentation de 250 mg de magnésium/jour en plus d'une alimentation variée et équilibrée n'a donné aucun résultat au terme de 8 semaines de tests. La divergence de résultats peut s'expliquer par :

- Un apport insuffisant de magnésium, supplémentation comprise
- Ou un apport déjà suffisant en magnésium via l'alimentation, ce qui rendrait inutile la supplémentation [183]

Ainsi, il est difficile de statuer sur une efficacité réelle du magnésium si les apports quotidiens sont déjà remplis via l'alimentation. La supplémentation en magnésium ne semble apporter de bénéfices que pour les individus réellement carencés. Si tel est le cas, la prise de Mg quotidiennement peut être une bonne aide pour le pratiquant de musculation.

Toxicité

L'intoxication au magnésium (magnésémie > 3 mmol/L; taux N=[0,75;0,96] mmol/L) est rare mais peut avoir des répercussions cardiaques et neuro-musculaires. En cas de suspicion d'intoxication, il est nécessaire de se rediriger vers un centre hospitalier pour effectuer des analyses complémentaires. Les signes d'intoxications sont les suivants [184] :

- Nausées
- Troubles de la conscience
- Paralysie neuromusculaire
- Hypoventilation avec acidose respiratoire,
- Hypotension
- Bradycardie

4. Les probiotiques



Difficile de terminer cette thèse sans mentionner l'importance d'une flore intestinale efficace dans l'absorption des nutriments (macro et micro) que nous consommons. Une alimentation, aussi saine et équilibrée qu'elle puisse être, ne peut fournir les effets escomptés si l'absorption est altérée. Bien souvent, les sportifs font fi de l'importance du microbiote dans leur alimentation et pourtant, c'est un élément majeur pour leur objectif de prise de masse musculaire.

Nous l'avons vu, l'apport suffisant en macronutriments est impératif pour le sportif de force en désir d'une prise de masse musculaire et d'un gain de force. Néanmoins, il est tout aussi important pour lui de varier ses sources de protéines et de glucides et de consommer suffisamment d'oméga 3 et de fibres (glucides non digestibles) afin d'avoir une flore intestinale diversifiée.

Chaque régime alimentaire peut affecter positivement ou négativement le microbiote, qu'il soit pris sur une courte ou une longue durée. A titre d'exemple, la consommation d'acides gras saturés à outrance mène à un microbiote pro-inflammatoire et augmente la perméabilité intestinale ce qui a un impact négatif sur les performances sportives tandis que la consommation de fibres a un impact positif sur la diversité du microbiote, tout comme le lactose qui apporte des bifidobactéries et des lactobacilles [185]. Bien souvent, les bodybuilders se soucient de leurs apports en protéines et délaissent les fibres, jugés peu importants. Pourtant, une consommation de fibres à hauteur de 14 g / 1000 kcal consommés/jour à distance de l'entraînement (du fait de son action sur le transit) peut assurer un bon équilibre gastro-intestinal et réduire l'inflammation.

Le microbiote peut **augmenter les performances à l'effort** en produisant des acides gras volatiles (ou acides gras à chaîne courte, AGV) qui sont utilisés par les colonocytes comme source d'énergie ou mis en circulation. Dans les muscles, ces AGV peuvent, via une oxydation, être métabolisés en glucose via la néoglucogenèse ou augmenter la biodisponibilité du glucose, du glycogène et des acides gras au cours de l'exercice [186]. Ils augmentent donc indirectement les capacités énergétiques du sportif, en lien direct avec ses performances sportives. Les AGV ont aussi la capacité de limiter le catabolisme musculaire. [187]. La prise de probiotiques peut l'aider à optimiser ses apports nutritifs au service d'un gain de performances sportives lorsque son régime est trop restrictif ou peu varié. Les probiotiques sont des micro-organismes vivants

qui, lorsqu'ils sont administrés en quantité adéquate, confèrent un avantage pour la santé de l'hôte (OMS). Leur consommation implique une modification du microbiote intestinal qui, selon la souche choisie, peut être bénéfique pour le sportif de force.

Le dosage est variable d'une marque à l'autre et la dose efficace dépend des besoins de chacun (microbiote inter individuel différent) ce qui rend difficile l'évaluation de l'efficacité des probiotiques [188]. La dose indiquée sera celle mentionnée par le fabricant lors de la mise sur le marché et dépendra de la souche et des évaluations qui ont permis la vente. Toutefois, les recherches se font de plus en plus nombreuses dans ce domaine.

Les souches principales et celles à privilégier

Les classiques :

- Bifidobacterium spp.
- Lactobacillus

Puis +/- :

- Bacillus spp.
- Enterococcus spp.
- Streptococcus spp.
- Veillonella
- Saccharomyces boulardii



Le rapport de la Société Internationale de Nutrition Sportive (INSS) [189] mentionne 2 souches particulièrement intéressantes chez le sportif de force :

- ***B. breve* BR03** (dose de 5 milliards / UFC) : Aide directement au maintien de la santé gastro duodénale et indirectement à la récupération musculaire post-entraînement
- ***B. coagulans* GBI-30, 6086** (dose d'un milliard / UFC) : Améliore les symptômes de douleurs musculaires survenant après l'entraînement. Lorsqu'elle se retrouve dans le milieu intestinal, cette souche produit des protéases alcalines qui digère les protéines plus efficacement que les protéases humaines endogènes [190]. Il existe actuellement sur le marché des pots de protéines en poudre enrichis en *B. coagulans* pour améliorer l'assimilation de la leucine entre autres.

Intérêts de la supplémentation en probiotiques chez un sportif de force

Entre autres et pertinents dans le cadre d'une prise de masse musculaire [191] :

- Réduisent les inflammations
- Réduisent les douleurs musculaires
- Réduisent la perméabilité gastro-intestinale
- Améliore l'absorption et l'utilisation des nutriments par leur action sur la perméabilité de la jonction serrée de la barrière intestinale.
- Produisent des enzymes digestives améliorant la digestibilité des aliments et améliorant entre autres l'absorption des acides aminés (par digestion accélérée des protéines)
- Augmente la quantité de glucides disponible lors de l'exercice et le stockage de glycogène au repos

Selon l'étude de Lee et al. (2020) [192], une supplémentation de 4 semaines en *Lactobacillus salivarius* chez un haltérophile a diminué le taux de lactate intramusculaire (facteur de fatigue précoce) et de créatine kinase mais a augmenté la force musculaire, les performances sportives et l'endurance et a favorisé le stockage de glycogène dans les cellules

hépatiques et musculaires. L'étude de Georges et al. (2014) [193] évalue les effets d'un apport concomitant de 20g de protéine de caséine avec et sans *Bacillus coagulans* GBI-30, 6086 associé à 8 semaines d'entraînement de musculation et démontre une amélioration de la performance dans le groupe suppléé par l'association probiotique+protéine. Un effet que Jäger et al. (2019) [189] allouent à une meilleure récupération musculaire sous probiotiques + protéines. Les études montrent également qu'il vaut mieux privilégier la prise de probiotiques multisouches, plutôt qu'un probiotique monosouche, à l'image de la préconisation d'une alimentation diversifiée pour avoir un microbiote varié.

Néanmoins, la supplémentation en probiotiques est un domaine assez peu étudié, contrairement à d'autres compléments alimentaires du sportif et mériterait de plus amples approfondissements. Il est à noter qu'il est assez difficile de limiter les biais dans ces études car la flore microbienne de chaque individu est différente (du moins, lorsqu'ils débutent l'étude). L'alimentation de chacun peut aussi faire varier la composition du microbiote et altérer les résultats de l'étude.

En outre, il est clair qu'un apport exogène en probiotique ne remplace en aucun cas une alimentation variée et équilibrée, mais peut être un plus.

Conclusion...

La pratique de la musculation est un sport de plus en plus prisé par les personnes cherchant à prendre du muscle et à perdre du poids. Auparavant critiqué comme étant un sport donnant un aspect “trop massif”, “trop masculin” (chez les femmes) et “inesthétique pour le quotidien” par la population générale, il a, depuis quelques années, subi un réel essor notamment via les réseaux sociaux et la presse. Néanmoins, malgré une pratique assidue de musculation, la prise de masse musculaire peut être ralentie par une nutrition inadéquate.

Ainsi, il est important pour le pratiquant de musculation d’être assidu, autant sur sa pratique sportive, que sur les nutriments qu’il fournit à son corps pour la récupération et la prise de masse musculaire.

Cette thèse a pour objectif de mettre en exergue les aliments et compléments alimentaires (et leur quantité adéquate) à privilégier pour optimiser la prise de masse musculaire.

Parmi eux, les macronutriments tiennent une place importante dans la nutrition du sportif : le pratiquant de musculation devra particulièrement prêter attention à ses apports en protéines en priorité, puis en glucides, et enfin en lipides. Les apports caloriques journaliers seront aussi à comptabiliser : un apport calorique insuffisant freinera la prise de masse musculaire malgré les 1,6g de protéines/kg/jour ; tandis qu’un apport bien plus conséquent que l’objectif fixé mènera à une prise de masse grasse importante. L’apport en eau (plus importante qu’en l’absence de pratique sportive du fait de la transpiration, etc..) et en minéraux et vitamines via les fruits et les légumes ne sera pas non plus à négliger. Le sommeil impacte aussi grandement la récupération musculaire et les performances sportives. La consommation d’alcool et de cigarettes est à proscrire si l’on ne veut pas altérer ses performances et freiner sa progression, c’est pourquoi la pratique de ce sport mène à une réelle hygiène de vie quotidienne et en tout point.

Pour compléter ses apports journaliers, et toujours dans cet objectif de prise de masse musculaire, le sportif pourra ajuster ses besoins avec des compléments alimentaires. De nos jours, ces compléments se font de plus en plus nombreux, vantant tous des mérites et effets qui relèveraient presque du spectaculaire. Mais comment déceler les compléments réellement utiles des moins utiles ? En lisant de nombreuses revues et études, il apparaît que les plus pertinents seraient ceux énumérés dans cette thèse (avec les connaissances actuelles), mais là encore les études mènent à des conclusions différentes ce qui ne permet pas d’en garantir l’efficacité pour tous les individus. D’autres suppléments pour la prise de masse musculaire existent, notamment un large panel d’acides aminés (arginine, glutamine, ...), des boosters hormonaux (GH, IGF...), des plantes, ... mais n’ont pas encore réellement fait leurs preuves à ce jour et mériteraient de plus amples recherches.

En somme, la nutrition du sportif est un domaine assez complexe, dont les rouages sont à comprendre en profondeur avant de se lancer dans la mise en place de plan nutritionnels. C’est un domaine en constante évolution, avec la formulation de nouveaux compléments alimentaires et il est important d’en comprendre l’utilité avant de tomber dans le piège des arguments marketing. Tout changement nutritionnel brusque se doit d’être encadré d’un professionnel de santé. En ces termes, le pharmacien, grâce à ses connaissances multidisciplinaires, est un interlocuteur de choix pour conseiller le sportif face à la l’abondance de produits disponibles sur le marché. Il est à même de pouvoir comprendre le fonctionnement des diverses molécules

sur notre organisme ainsi que des voies métaboliques associés et de les expliquer au patient afin de rendre les termes plus compréhensibles. Sa place est également importante car il est là pour conseiller le patient selon ses besoins réels et pourra, en ayant une vue sur les comorbidités et habitudes de vie du patient, y déceler des contre-indications à la consommation de telle ou telle supplémentation. Son devoir de conseil est un atout majeur à ne pas négliger.

Vers la réussite de sa prise de masse musculaire

ETAPE 1

Calcul de ses besoins caloriques quotidiens
Cf. partie II

ETAPE 2

Calculs de ses besoins en protéines

- 1,6 g de protéines /kg de poids corporel par jour
- Si 4 repas : 0,4 g de protéines / kg / repas
- Whey : 20 à 30g/portion (selon la marque et la teneur en calories et protéines)
- Caséine en collation nocturne : 40 g/portion

Dont leucine :

- repos : 2 g de leucine toutes les 3 à 5 h
- post-entraînement : 3,5 g

ETAPE 3

Calcul de ses besoins en glucides

- 5 à 7 g / kg, à adapter selon l'apport calorique quotidien fixé

Calcul de ses besoins en lipides

- 20 à 35% des apports caloriques journaliers soit 0,5 à 1,5 g/kg/jour
- Rapport oméga 6/oméga 3 de 5/1

ETAPE 4 (facultative)

COMPLÉMENTS ALIMENTAIRES

Acides Aminés :

- Seuil minimal de 10 g d'AAE/jour
- BCAA : 6g autour de l'entraînement et/ou pendant
- HMB : 3g/jour
- Créatine :
 - Dose d'attaque : 0,3g/kg/jour
 - Dose d'entretien : 0,03 g/kg/jour

Omega 3 :

- 3g/jour (en plus des apports via l'alimentation)

Vitamine D :

OMS :

- 600 UI/jour chez les moins de 70 ans
- 800 UI/jour chez les plus de 70 ans

ES :

- 1500-2200 UI/jour

Magnésium :

- Homme : 400 à 420 mg
- Femme 310 à 320 mg

Sources

- [1] Larousse et cours de PACES.
- [2] Anatomie 3D Lyon : <https://www.youtube.com/watch?v=x2CTIZImmSY>
- [3] Bamman MM, Roberts BM, Adams GR. Molecular Regulation of Exercise-Induced Muscle Fiber Hypertrophy. *Cold Spring Harb Perspect Med*. 2018;8(6):a029751.
- [4] Tipton KD, Gurkin BE, Matin S & Wolfe RR. (1999). Nonessential amino acids are not necessary to stimulate net muscle protein synthesis in healthy volunteers. *J Nutr Biochem* 10, 89-95.
- [5] Drummond MJ, Fry CS, Glynn EL, Dreyer HC, Dhanani S, Timmerman KL, Volpi E & Rasmussen BB. (2009). Rapamycin administration in humans blocks the contraction-induced increase in skeletal muscle protein synthesis. *J Physiol* 587, 1535-1546.
- [6] Baar K & Esser K. (1999). Phosphorylation of p70(S6k) correlates with increased skeletal muscle mass following resistance exercise. *Am J Physiol* 276, C120-127.
- [7] Pasiakos SM. Exercise and Amino Acid Anabolic Cell Signaling and the Regulation of Skeletal Muscle Mass. *Nutrients*. 2012;4(7):740-758. doi:10.3390/nu4070740
- [8] Boirie Y, Guillet C, Cano N, Walrand S. Signaux anaboliques et optimisation du métabolisme musculaire. *Nutrition Clinique et Métabolisme*. 2009;23(2):72-75. doi:10.1016/j.nupar.2009.02.001
- [9] Deldicque L, Theisen D, Francaux M. Regulation of mTOR by amino acids and resistance exercise in skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol*. 2005;94(1-2):1-10. doi:10.1007/s00421-004-1255-6
- [10] Burd NA, West DW, Moore DR, Atherton PJ, Staples AW, Prior T, Tang JE, Rennie MJ, Baker SK & Phillips SM. (2011). Enhanced amino acid sensitivity of myofibrillar protein synthesis persists for up to 24 h after resistance exercise in young men. *The Journal of nutrition* 141, 568-573.
- [11] Wackerhage H, Schoenfeld BJ, Hamilton DL, Lehti M, Hulmi JJ. Stimuli and sensors that initiate skeletal muscle hypertrophy following resistance exercise. *Journal of Applied Physiology*. 2019;126(1):30-43. doi:10.1152/jappphysiol.00685.2018
- [12] Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, West DW, Burd NA, Breen L, Baker SK & Phillips SM. (2012). Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *J Appl*
- [13] Kraemer WJ, Ratamess NA, Nindl BC. Recovery responses of testosterone, growth hormone, and IGF-1 after resistance exercise. *Journal of Applied Physiology*. 2017;122(3):549-558. doi:10.1152/jappphysiol.00599.2016

- [14] BIGARD, André-Xavier ; MALGOYRE, Alexandra. Thème 2. Nutrition et contrôle de la masse musculaire dans les sports à challenge métabolique In : Nutrition et performance en sport : la science au bout de la fourchette [en ligne]. Paris : INSEP-Éditions, 2012 (généré le 25 janvier 2022).
- [15] Mosoni L. Le métabolisme protéique musculaire, contrôle nutritionnel. *Nutrition Clinique et Métabolisme*. 2014;28(1):29-37. doi:10.1016/j.nupar.2013.12.003
- [16] FLECK, S. J., KREAMER, W. *Designing resistance programmes*, 2e ed., 1997, p. 275
- [17] Blair CREWETHER, Justin KEOGH, John CRONIN et Christian COOK, Possible Stimuli for Strength and Power Adaptation Acute Hormonal Responses, *Sports Med*, 2006, 36 (3), p. 215-238
- [18] SPIERING BA, KRAEMER WJ, ANDERSON JM, ARMSTRONG LE, NINDL BC, VOLEK JS, MARESH CM. Resistance Exercise Biology; manipulation of resistance exercise programme variables determines the responses of cellular and molecular signalling pathways, *Sports Med*, 2008, 38 (7), p. 527-540
- [19] M. Neinast, D. Murashige, et Z. Arany, « Branched Chain Amino Acids », *Annu Rev Physiol*, vol. 81, p. 139-164, févr. 2019, doi: 10.1146/annurev-physiol-020518-114455.
- [20] B. J. Schoenfeld et A. A. Aragon, « How much protein can the body use in a single meal for muscle-building? Implications for daily protein distribution », *J Int Soc Sports Nutr*, vol. 15, p. 10, févr. 2018, doi: 10.1186/s12970-018-0215-1.
- [21] H. P. Cintineo, M. A. Arent, J. Antonio, et S. M. Arent, « Effects of Protein Supplementation on Performance and Recovery in Resistance and Endurance Training », *Front Nutr*, vol. 5, p. 83, 2018, doi: 10.3389/fnut.2018.00083.
- [22] R. W. Morton et al., « A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults », *Br J Sports Med*, vol. 52, n° 6, p. 376-384, mars 2018, doi: 10.1136/bjsports-2017-097608.
- [23] Witard OC, Jackman SR, Breen L, Smith K, Selby A, Tipton KD. Myofibrillar muscle protein synthesis rates subsequent to a meal in response to increasing doses of whey protein at rest and after resistance exercise. *Am J Clin Nutr*. 2014;99(1):86–95. doi: 10.3945/ajcn.112.055517.
- [24] C. M. Kerksick et al., « International society of sports nutrition position stand: nutrient timing », *J Int Soc Sports Nutr*, vol. 14, p. 33, août 2017, doi: 10.1186/s12970-017-0189-4.
- [25] Pitkanen H. et al. Serum amino acid responses to three different exercise sessions in male power athletes. *J Sports Med Phys Fitness*. 2002 Dec ; 38 (2) : 339-348.
- [26] Borsheim E, Tipton KD, Wolf SE, Wolfe RR. Essential amino acids and muscle protein recovery from resistance exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2002;283:E648–57.

- [27] Cuthbertson D, Smith K, Babraj J, Leese G, Waddell T, Atherton P, et al. Anabolic signaling deficits underlie amino acid resistance of wasting, aging muscle. *FASEB J*. 2005;19:422–4.
- [28] Campbell WW, Barton ML Jr, Cyr-Campbell D, Davey SL, Beard JL, Parise G, et al. Effects of an omnivorous diet compared with a lactoovovegetarian diet on resistance-training-induced changes in body composition and skeletal muscle in older men. *Am J Clin Nutr*. 1999;70:1032–9.
- [29] R. Jäger et al., « International Society of Sports Nutrition Position Stand: protein and exercise », *J Int Soc Sports Nutr*, vol. 14, p. 20, 2017, doi: 10.1186/s12970-017-0177-8.
- [30] Andersen LL, Tufekovic G, Zebis MK, Crameri RM, Verlaan G, Kjaer M, Suetta C, Magnusson P, Aagaard P. The Effect Of Resistance Training Combined With Timed Ingestion Of Protein On Muscle Fiber Size And Muscle Strength. *Metab Clin Exp*. 2005;54(2):151–6.
- [31] Schoenfeld BJ, Aragon A, Wilborn C, Urbina S, Hayward SB, Krieger JW. PreVersus Post-Exercise Protein Intake Has Similar Effects On Muscular Adaptations. *Peer J*. 2016;3(5):e2825.
- [32] S. M. Phillips, « The impact of protein quality on the promotion of resistance exercise-induced changes in muscle mass », *Nutr Metab (Lond)*, vol. 13, p. 64, sept. 2016, doi: 10.1186/s12986-016-0124-8.
- [33] Beelen M, Koopman R, Gijzen AP, Vandereyt H, Kies AK, Kuipers H, et al. Protein coingestion stimulates muscle protein synthesis during resistancetype exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab*. 2008;295(1):E70–7.
- [34] Frédéric Delavier, Guide des compléments alimentaires pour sportifs, Editions VIGOT, mars 2019
- [35] N. V. Alexandrov, C. Eelderink, C. M. Singh-Povel, G. J. Navis, S. J. L. Bakker, et E. Corpeleijn, « Dietary Protein Sources and Muscle Mass over the Life Course: The Lifelines Cohort Study », *Nutrients*, vol. 10, n° 10, p. 1471, oct. 2018, doi: 10.3390/nu10101471.
- [36] Hartman JW, Tang JE, Wilkinson SB, Tarnopolsky MA, Lawrence RL, Fullerton AV, et al. Consumption of fat-free fluid milk after resistance exercise promotes greater lean mass accretion than does consumption of soy or carbohydrate in young, novice, male weightlifters. *Am J Clin Nutr*. 2007;86(2):373–81.
- [37] Cederroth CR, Vinciguerra M, Gjinovci A, Kuhne F, Klein M, Cederroth M, et al. Dietary phytoestrogens activate amp-activated protein kinase with improvement in lipid and glucose metabolism. *Diabetes*. 2008;57:1176–85
- [38] Purpura M, Lowery RP, Joy JM, De Souza EO, Kalman D. A comparison of blood amino acid concentrations following ingestion of rice and whey protein isolate: a double-blind, crossover study. *J Nutr Health Sci*. 2014;1:306.

- [39] Volek JS, Volk BM, Gomez AL, Kunces LJ, Kupchak BR, Freidenreich DJ, et al. Whey protein supplementation during resistance training augments lean body mass. *J Am Coll Nutr.* 2013;32(2):122–35.
- [40] A. A. Aragon *et al.*, « International society of sports nutrition position stand: diets and body composition », *J Int Soc Sports Nutr*, vol. 14, p. 16, 2017, doi: 10.1186/s12970-017-0174-y.
- [41] Antonio J, Peacock C, Ellerbroek A, Fromhoff B, Silver T. The effects of consuming a high protein diet (4.4 g/kg/d) on body composition in resistance-trained individuals. *J Int Soc Sports Nutr.* 2014;11:19. doi:10.1186/1550-2783-11-19,
- [42] Antonio J, Ellerbroek A, Silver T, Orris S, Scheiner M, Gonzalez A, et al. A high protein diet (3.4 g/kg/d) combined with a heavy resistance training program improves body composition in healthy trained men and women—a follow-up investigation. *J Int Soc Sports Nutr.* 2015;12:39.
- [43] Antonio J, Ellerbroek A, Silver T, Vargas L, Peacock C. The effects of a high protein diet on indices of health and body composition—a crossover trial in resistance-trained men. *J Int Soc Sports Nutr.* 2016;13:3. doi:10.1186/s12970016-0114-2.
- [44] Antonio J, Ellerbroek A, Silver T, Vargas L, Tamayo A, Buehn R, et al. A high protein diet has no harmful effects: a one-year crossover study in resistance-trained males. *J Nutr Metab.* 2016;2016:9104792. doi:10.1155/2016/9104792.
- [45] E. A. Nunes *et al.*, « Systematic review and meta-analysis of protein intake to support muscle mass and function in healthy adults », *J Cachexia Sarcopenia Muscle*, vol. 13, n° 2, p. 795-810, avr. 2022, doi: 10.1002/jesm.12922
- [46] Longland T, Oikawa S, Mitchell C, Devries M, Phillips S. Higher compared with lower dietary protein during an energy deficit combined with intense exercise promotes greater lean mass gain and fat mass loss: a randomized trial. *Am J Clin Nutr.* 2016;103(3):738–46.
- [47] Gaine P.C. et al Level of dietary protein impacts whole body protein turnover in trained males at rest. *Metabolism.* 2006 Apr; 55(4):501-7
- [48] Sallinen J. et al. Relationship between diet and serum anabolic hormone response to heavy-resistance exercise in men. *Int J Sports Med.* 2004 Nov ; 25 (8) : 627-33
- [49] World Health Organization, Technical report series 935. Protein and amino acid requirements in human nutrition: report of a joint fao/who/uni expert consultation. 2011.
- [50] Jacobs, I.; Kaiser, P.; Tesch, P. Muscle strength and fatigue after selective glycogen depletion in human skeletal muscle fibers. *Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.* 1981, 46, 47–53.
- [51] J.-A. Nazare, F. Péronnet, et M. Laville, « Sucres, métabolisme musculaire et exercice physique », *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, vol. 43, p. 2S17-2S20, déc. 2008, doi: 10.1016/S0007-9960(08)71551-7.

- [52] Foster-Powel, K., Holt, S.H.A, Brand-Miller, J.C. 2002. International tables of glycaemic index and glycemic load values. *American Journal of Clinical Nutrition*, 76:5-56.
- [53] Ray, S.; Sale, D.G.; Lee, P.; Garner, S.; MacDougall, J.D.; McCartney, N. Muscle Substrate Utilization and Lactate Production During Weightlifting. *Can. J. Appl. Physiol.* 1999, 24, 209–215.
- [54] Coyle EF, Coggan AR, Hemmert MK, Lowe RC, Walters TJ. Substrate Usage During Prolonged Exercise Following A Preexercise Meal. *J Appl Physiol.* 1985;59(2):429–433.
- [55] Rodriguez NR, Di Marco NM, Langley S. American College Of Sports Medicine Position Stand. Nutrition And Athletic Performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41(3):709–731.
- [56] Mitchell L, Hackett D, Gifford J, Estermann F, O'Connor H. Do Bodybuilders Use Evidence-Based Nutrition Strategies to Manipulate Physique? *Sports (Basel)*, 2017a; 5
- [57] Jentjens R, Jeukendrup A. Determinants of post-exercise glycogen synthesis during short-term recovery. *Sports Med*, 2003; 33: 117-44], [Hackett DA, Johnson NA, Chow CM. Training practices and ergogenic aids used by male bodybuilders. *J Strength Cond Res*, 2013; 27: 1609-17
- [58] Howarth KR, Moreau NA, Phillips SM, Gibala MJ. Coingestion Of Protein With Carbohydrate During Recovery From Endurance Exercise Stimulates Skeletal Muscle Protein Synthesis In Humans. *J Appl Physiol.* 2009;106(4):1394–1402.
- [59] Van Hall G, Shirreffs SM, Calbet JA. Muscle Glycogen Resynthesis During Recovery From Cycle Exercise: No Effect Of Additional Protein Ingestion. *Journal Of Applied Physiology (Bethesda, Md : 1985)* 2000;88(5):1631–1636
- [60] Van Loon L, Saris WH, Kruijshoop M. Maximizing Postexercise Muscle Glycogen Synthesis: Carbohydrate Supplementation And The Application Of Amino Acid Or Protein Hydrolysate Mixtures. *Am J Clin Nutr.* 2000;72:106–111
- [61] Lima-Silva, A.E.; Silva-Cavalcante, M.D.; Oliveira, R.S.; Kiss, M.A.; Pires, F.O.; Bertuzzi, R.; Bishop, D. Effects of a low- or a high-carbohydrate diet on performance, energy system contribution, and metabolic responses during supramaximal exercise. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 2013, 38, 928–934.
- [62] Tinsley, G.M.; Willoughby, D.S. Fat-Free Mass Changes During Ketogenic Diets and the Potential Role of Resistance Training. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2016, 26, 78–92.
- [63] Kephart, W.C.; Pledge, C.D.; Roberson, P.A.; Mumford, P.W.; Romero, M.A.; Mobley, C.B.; Martin, J.S.; Young, K.C.; Lowery, R.P.; Wilson, J.M.; et al. The Three-Month Effects of a Ketogenic Diet on Body Composition, Blood Parameters, and Performance Metrics in CrossFit Trainees: A Pilot Study. *Sports* 2018, 6, 1.
- [64] Cholewa, J.M.; Newmire, D.E.; Zanchi, N.E. Carbohydrate restriction: Friend or foe of resistance-based exercise performance? *Nutrition* 2019, 60, 136–146.

- [65] Dalton RA, Rankin JW, Sebolt D, Gwazdauskas F. Acute Carbohydrate Consumption Does Not Influence Resistance Exercise Performance During Energy Restriction. *Int J Sport Nutr.* 1999;9(4):319–332. doi: 10.1123/ijnsn.9.4.319.
- [66] Haff GG, Koch AJ, Potteiger JA, Kuphal KE, Magee LM, Green SB, Jakicic JJ. Carbohydrate Supplementation Attenuates Muscle Glycogen Loss During Acute Bouts Of Resistance Exercise. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2000;10(3):326–339. doi: 10.1123/ijnsnem.10.3.326.
- [67] Kulik JR, Touchberry CD, Kawamori N, Blumert PA, Crum AJ, Haff GG. Supplemental Carbohydrate Ingestion Does Not Improve Performance Of High-Intensity Resistance Exercise. *J Strength Cond Res.* 2008;22(4):1101–1107. doi: 10.1519/JSC.0b013e31816d679b
- [68] Fujita S, Dreyer HC, Drummond MJ, Glynn EL, Volpi E, Rasmussen BB. Essential Amino Acid And Carbohydrate Ingestion Before Resistance Exercise Does Not Enhance Postexercise Muscle Protein Synthesis. *J Appl Physiol (1985).* 2009;106(5):1730–9.
- [69] Greenhaff PL, Karagounis LG, Peirce N, Simpson EJ, Hazell M, Layfield R, Wackerhage H, Smith K, Atherton P, Selby A, et al. Disassociation Between The Effects Of Amino Acids And Insulin On Signaling, Ubiquitin Ligases, And Protein Turnover In Human Muscle. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2008; 295(3):E595–604.
- [70] Bird SP, Tarpenning KM, Marino FE. Liquid Carbohydrate/Essential Amino Acid Ingestion During A Short-Term Bout Of Resistance Exercise Suppresses Myofibrillar Protein Degradation. *Metab Clin Exp.* 2006;55(5):570–7.
- [71] Tipton KD, Rasmussen BB, Miller SL, Wolf SE, Owens-Stovall SK, Petrini BE, Wolfe RR. Timing Of Amino Acid-Carbohydrate Ingestion Alters Anabolic Response Of Muscle To Resistance Exercise. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2001;281(2):E197–206.
- [72] Koopman R, Wagenmakers AJ, Manders RJ, Zorenc AH, Senden JM, Gorselink M, Keizer HA, van Loon LJ. Combined ingestion of protein and free leucine with carbohydrate increases postexercise muscle protein synthesis in vivo in male subjects. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2005 Apr;288(4):E645-53. doi: 10.1152/ajpendo.00413.2004. Epub 2004 Nov 23. PMID: 15562251.
- [73] J. Iraki, P. Fitschen, S. Espinar, et E. Helms, « Nutrition Recommendations for Bodybuilders in the Off-Season: A Narrative Review », *Sports (Basel)*, vol. 7, n° 7, p. E154, juin 2019, doi: 10.3390/sports7070154.
- [74] Wilson J, Lowery R, Roberts M, Sharp M, Joy J, Shields K, et al. The effects of ketogenic dieting on body composition, strength, power, and hormonal profiles in resistance training males. *J Strength Cond Res.* 2017. doi: 10.1519/JSC.0000000000001935.
- [75] M D Mifflin, S T St Jeor, L A Hill, B J Scott, S A Daugherty, Y O Koh, A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals, *The American Journal of Clinical Nutrition*, Volume 51, Issue 2, February 1990, Pages 241–247
- [76] Forbes G. B., Brown M. R., Welle S. L., Underwood L. E. Hormonal response to overfeeding. *Am. J. Clin. Nutr.* 49:1989-608611

- [77] Garthe, I.; Raastad, T.; Refsnes, P.E.; Sundgot-Borgen, J. Effect of nutritional intervention on body composition and performance in elite athletes. *Eur. J. Sport Sci.* 2013, 13, 295–303
- [78] American College of Sports Medicine. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med. Sci. Sport. Exerc.* 2009, 41, 687–708.
- [79] Julien Venesson, *Nutrition de la force*, Editions Souccar, 2011
- [80] Areta, J.L.; Burke, L.M.; Ross, M.L.; Camera, D.M.; West, D.W.D.; Broad, E.M.; Jeacocke, N.A.; Moore, D.R.; Stellingwerff, T.; Phillips, S.M.; et al. Timing and distribution of protein ingestion during prolonged recovery from resistance exercise alters myofibrillar protein synthesis. *J. Physiol.* 2013, 591, 2319–2331.
- [81] H. C. G. Nabuco et al., « Effects of Whey Protein Supplementation Pre- or Post-Resistance Training on Muscle Mass, Muscular Strength, and Functional Capacity in Pre-Conditioned Older Women: A Randomized Clinical Trial », *Nutrients*, vol. 10, n° 5, p. E563, mai 2018, doi: 10.3390/nu10050563
- [82] Morton, R.W.; Murphy, K.T.; McKellar, S.R.; Schoenfeld, B.J.; Henselmans, M.; Helms, E.; Aragon, A.A.; Devries, M.C.; Banfield, L.; Krieger, J.W.; et al. A systematic review, meta-analysis and meta-regression of the effect of protein supplementation on resistance training-induced gains in muscle mass and strength in healthy adults. *Br. J. Sports Med.* 2017.
- [83] Adams RL, Broughton KS. Insulinotropic Effects of Whey: Mechanisms of Action, Recent Clinical Trials, and Clinical Applications. *Ann Nutr Metab.* 2016;69(1):56-63. doi: 10.1159/000448665. Epub 2016 Aug 17. PMID: 27529642.
- [84] T. Stokes, A. Hector, R. Morton, C. McGlory, et S. Phillips, « Recent Perspectives Regarding the Role of Dietary Protein for the Promotion of Muscle Hypertrophy with Resistance Exercise Training », *Nutrients*, vol. 10, n° 2, p. 180, févr. 2018, doi: 10.3390/nu10020180.
- [85] Tang, J.E.; Moore, D.R.; Kujbida, G.W.; Tarnopolsky, 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. *J. Appl. Physiol.* 2009, 107, 987–992.
- [86] Pennings, B.; Boirie, Y.; Senden, J.M.G.; Gijzen, A.P.; Kuipers, H.; van Loon, L.J.C. Whey protein stimulates postprandial muscle protein accretion more effectively than do casein and casein hydrolysate in older men. *Am. J. Clin. Nutr.* 2011, 93, 997–1005.
- [87] Burd, N.A.; Yang, Y.; Moore, D.R.; Tang, J.E.; Tarnopolsky, M.A.; Phillips, S.M. Greater stimulation of myofibrillar protein synthesis with ingestion of whey protein isolate v. micellar casein at rest and after resistance exercise in elderly men. *Br. J. Nutr.* 2012, 108, 958–962
- [88] Trommelen J, van Loon LJ. Pre-Sleep Protein Ingestion to Improve the Skeletal Muscle Adaptive Response to Exercise Training. *Nutrients.* 2016 Nov 28;8(12):763. doi: 10.3390/nu8120763. PMID: 27916799; PMCID: PMC5188418.

- [89] Berrazaga I, Micard V, Gueugneau M, Walrand S. The Role of the Anabolic Properties of Plant- versus Animal-Based Protein Sources in Supporting Muscle Mass Maintenance: A Critical Review. *Nutrients*. 2019 Aug 7;11(8):1825. doi: 10.3390/nu11081825. PMID: 31394788; PMCID: PMC6723444.
- [90] Gilani G.S., Cockell K.A., Sepehr E. Effects of antinutritional factors on protein digestibility and amino acid availability in foods. *J. AOAC Int.* 2005;88:967–987.
- [91] Kalman D, Feldman S, Martinez M, Krieger DR, Tallon MJ. Effect of protein source and resistance training on body composition and sex hormones. *J Int Soc Sports Nutr.* 2007;4:4.
- [92] Reed KE, Camargo J, Hamilton-Reeves J, Kurzer M, Messina M. Neither soy nor isoflavone intake affects male reproductive hormones: An expanded and updated meta-analysis of clinical studies. *Reprod Toxicol.* 2021 Mar;100:60-67. doi: 10.1016/j.reprotox.2020.12.019. Epub 2020 Dec 28. PMID: 33383165.
- [93] Dillingham B.L. et al. Soy Protein isolates of varying isoflavone content exert minor effects on serum reproductive hormones in healthy young men *J Nutr.* 2005 Mar ; 135 (3) : 584-91
- [94] Messina M. Soy and Health Update: Evaluation of the Clinical and Epidemiologic Literature. *Nutrients*. 2016 Nov 24;8(12):754. doi: 10.3390/nu8120754. PMID: 27886135; PMCID: PMC5188409.
- [95] Fielden M.R., Samy S.M., Chou K.C., Zacharewski T.R. Effect of human dietary exposure levels of genistein during gestation and lactation on long-term reproductive development and sperm quality in mice. *Food Chem. Toxicol.* 2003;41:447–454. doi: 10.1016/S0278-6915(02)00284-3.
- [96] Brown E.C., et al. Soy versus whey protein bars : effects on exercise training impact on lean body mass and antioxidant status. *Nutr J.* 2004 Dec 8 ; 3 : 22.
- [97] Joy J.M., Lowery R.P., Wilson J.M., Purpura M., De Souza E.O., Wilson S.M.C., Kalman D.S., Dudeck J.E., Jager R. The effects of 8 weeks of whey or rice protein supplementation on body composition and exercise performance. *Nutr. J.* 2013;12:86. doi: 10.1186/1475-2891-12-86.
- [98] Babault N., Paizis C., Deley G., Guerin-Deremaux L., Saniez M.H., Lefranc-Millot C., Allaert F.A. Pea proteins oral supplementation promotes muscle thickness gains during resistance training: A double-blind, randomized, Placebo-controlled clinical trial vs. Whey protein. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2015;12:3. doi: 10.1186/s12970-014-0064-5.
- [99] Banaszek A., Townsend J.R., Bender D., Vantrease W.C., Marshall A.C., Johnson K.D. The Effects of Whey vs. Pea Protein on Physical Adaptations Following 8-Weeks of High-Intensity Functional Training (HIFT): A Pilot Study. *Sports (Basel)* 2019;7:12. doi: 10.3390/sports7010012.
- [100] Kreider R.B. et al. Effects of ingesting supplements designed to promote lean tissue accretion on body composition during resistance training. *Int J Sport Nutr.* 1966 Sep; 6 (3) : 234-46

- [101] Chandler R. M., Byrne H. K., Patterson J. G., Ivy J. L. Dietary supplements affect the anabolic hormones after weight-training exercise. *J. Appl. Physiol.* 76:1994-839845
- [102] Kraemer WJ, Volek JS, Bush JA, Putukian M, Sebastianelli WJ. Hormonal responses to consecutive days of heavy-resistance exercise with or without nutritional supplementation. *J Appl Physiol* (1985). 1998 Oct;85(4):1544-55. doi: 10.1152/jappl.1998.85.4.1544. PMID: 9760352.
- [103] Cribb, P.J.; Williams, A.D.; Carey, M.F.; Hayes, A. The effect of whey isolate and resistance training on strength, body composition, and plasma glutamine. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 2006, 16, 494–509.
- [104] Volek, J.S.; Volk, B.M.; Gomez, A.L.; Kunces, L.J.; Kupchak, B.R.; Freidenreich, D.J.; Aristizabal, J.C.; Saenz, C.; Dunn-Lewis, C.; Ballard, K.D.; et al. Whey protein supplementation during resistance training augments lean body mass. *J. Am. Coll. Nutr.* 2013, 32, 122–135.
- [105] Tang, J.E.; Moore, D.R.; Kujbida, G.W.; Tarnopolsky, 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. *J. Appl. Physiol.* 2009, 107, 987–992.
- [106] D. K. Walker et al., « Exercise, Amino Acids and Aging in the Control of Human Muscle Protein Synthesis », *Med Sci Sports Exerc*, vol. 43, n° 12, p. 2249-2258, déc. 2011, doi: 10.1249/MSS.0b013e318223b037.
- [107] Mero A. et al. Leucine supplementation and serum amino acids, testosterone, cortisol and growth hormone in male power athletes during training. *J Sports Med Phys Fitness.* 1997 Jun; 37(2):137-45.
- [108] Karlsson H.K.R., et al. Branched-Chain Amino Acids increase p70s6k phosphorylation in human skeletal muscle after resistance training. *J Appl Physiol.* 2004 287 : E1-E7.
- [109] Stoll, B.; Burrin, D.G.; Henry, J.; Yu, H.; Jahoor, F.; Reeds, P.J. Dietary amino acids are the preferential source of hepatic protein synthesis in piglets. *J. Nutr.* 1998, 128, 1517–1524.
- [110] Groen, B.B.; Horstman, A.M.; Hamer, H.M.; de Haan, M.; van Kranenburg, J.; Bierau, J.; Poeze, M.; Wodzig, W.K.; Rasmussen, B.B.; van Loon, L.J. Post-prandial protein handling: You are what you just ate. *PLoS ONE* 2015, 10, e0141582.
- [111] Hutson, S.M. Subcellular distribution of branched-chain aminotransferase activity in rat tissues. *J. Nutr.* 1988, 118, 1475–1481.
- [112] C. de S. Santos et F. E. L. Nascimento, « Isolated branched-chain amino acid intake and muscle protein synthesis in humans: a biochemical review », *Einstein (Sao Paulo)*, vol. 17, n° 3, p. eRB4898, sept. 2019, doi: 10.31744/einstein_journal/2019RB4898.
- [113] Van Dusseldorp TA, Escobar KA, Johnson KE, Stratton MT, Moriarty T, Cole N, McCormick JJ, Kerksick CM, Vaughan RA, Dokladny K, Kravitz L, Mermier CM. Effect of Branched-Chain Amino Acid Supplementation on Recovery Following Acute Eccentric

Exercise. *Nutrients*. 2018 Oct 1;10(10):1389. doi: 10.3390/nu10101389. PMID: 30275356; PMCID: PMC6212987.

[114] Jackman, S.R.; Witard, O.C.; Jeukendrup, A.E.; Tipton, K.D. Branched-chain amino acid ingestion can ameliorate soreness from eccentric exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2010, 42, 962–970.

[115] Wolfe RR. Branched-chain amino acids and muscle protein synthesis in humans: myth or reality? *J Int Soc Sports Nutr.* 2017 Aug 22;14:30. doi: 10.1186/s12970-017-0184-9. PMID: 28852372; PMCID: PMC5568273.

[116] Sharp, C.P.; Pearson, D.R. Amino acid supplements and recovery from high-intensity resistance training. *J. Strength Cond. Res.* 2010, 24, 1125–1130.

[117] Bird, S.P.; Tarpinning, K.M.; Marino, F.E. Independent and combined effects of liquid carbohydrate/essential amino acid ingestion on hormonal and muscular adaptations following resistance training in untrained men. *Eur. J. Appl. Physiol.* 2006, 97, 225–238.

[118] C. B. Mobley et al., « Effects of Whey, Soy or Leucine Supplementation with 12 Weeks of Resistance Training on Strength, Body Composition, and Skeletal Muscle and Adipose Tissue Histological Attributes in College-Aged Males », *Nutrients*, vol. 9, n° 9, p. E972, sept. 2017, doi: 10.3390/nu9090972.

[119] Olsen, S.; Aagaard, P.; Kadi, F.; Tufekovic, G.; Verney, J.; Olesen, J.L.; Suetta, C.; Kjaer, M. Creatine supplementation augments the increase in satellite cell and myonuclei number in human skeletal muscle induced by strength training. *J. Physiol.* 2006, 573, 525–534.

[120] Pinheiro CH, Gerlinger-Romero F, Guimarães-Ferreira L, et al. Metabolic and functional effects of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate (HMB) supplementation in skeletal muscle. *Eur J Appl Physiol.* 2012;112:2531-2537.

[121] Kamei Y, Hatazawa Y, Uchitomi R, Yoshimura R, Miura S. Regulation of Skeletal Muscle Function by Amino Acids. *Nutrients.* 2020 Jan 19;12(1):261. doi: 10.3390/nu12010261. PMID: 31963899; PMCID: PMC7019684.

[122] Holecek M. Beta-hydroxy-beta-methylbutyrate supplementation and skeletal muscle in healthy and muscle-wasting conditions. *J Cachexia Sarcopenia Muscle.* 2017 Aug;8(4):529-541. doi: 10.1002/jcsm.12208. Epub 2017 May 10. PMID: 28493406; PMCID: PMC5566641.

[123] Holecek M, Vodenicarovova M. Effects of beta-hydroxy-beta-methylbutyrate supplementation on skeletal muscle in healthy and cirrhotic rats. *Int J Exp Pathol.* 2019 Jun;100(3):175-183. doi: 10.1111/iep.12322. Epub 2019 Jul 18. PMID: 31321841; PMCID: PMC6658908.

[124] Wilkinson D.J., Hossain T., Hill D.S., Phillips B.E., Crossland H., Williams J., Loughna P., Churchward-Venne T.A., Breen L., Phillips S.M., et al. Effects of leucine and its metabolite beta-hydroxy-beta-methylbutyrate on human skeletal muscle protein metabolism. *J. Physiol.* 2013;591:2911–2923. doi: 10.1113/jphysiol.2013.253203.

- [125] Ten Have GAM, Jansen L, Schooneman MG, Engelen MPKJ, Deutz NEP. Metabolic flux analysis of branched-chain amino and keto acids (BCAA, BCKA) and β -hydroxy β -methylbutyric acid across multiple organs in the pig. *Am J Physiol Endocrinol Metab.* 2021 Mar 1;320(3):E629-E640. doi: 10.1152/ajpendo.00384.2020. Epub 2021 Feb 1. PMID: 33522397.
- [126] Deutz NE, Pereira SL, Hays NP, Oliver JS, Edens NK, Evans CM, Wolfe RR. Effect of β -hydroxy- β -methylbutyrate (HMB) on lean body mass during 10 days of bed rest in older adults, March 2013.
- [127] Ransone J. et al. The effect of beta-hydroxy beta-methylbutyrate on muscular strength and body composition in collegiate footballer players. *J Strength Cond Res.* 2003 Feb ; 17(1):34-9
- [128] Hoffman J.R., et al. Effects of beta-hydroxy beta-methylbutyrate on power performance and indices of muscle damage and stress during high intensity training. *J Strength Cond Res.* 2004 Nov ; 18(4):747-52
- [129] Benedict S.R. Studies in creatine and creatinine metabolism. *J Biol Chem.* 1923;56:229
- [130] Kreider R.B. Effects of creatine supplementation on performance and training adaptations. *Mol. Cell. Biochem.* 2003;244:89–94. doi: 10.1023/A:1022465203458.
- [131] Wax B, Kerksick CM, Jagim AR, Mayo JJ, Lyons BC, Kreider RB. Creatine for Exercise and Sports Performance, with Recovery Considerations for Healthy Populations. *Nutrients.* 2021 Jun 2;13(6):1915. doi: 10.3390/nu13061915. PMID: 34199588; PMCID: PMC8228369.
- [132] Casey A., Constantin-Teodosiu D., Howell S., Hultman E., Greenhaff P.L. Creatine ingestion favorably affects performance and muscle metabolism during maximal exercise in humans. *Am. J. Physiol. Metab.* 1996;271:E31–E37. doi: 10.1152/ajpendo.1996.271.1.E31.
- [133] Safdar A, Yardley NJ, Snow R, Melov S, Tarnopolsky MA. Global and targeted gene expression and protein content in skeletal muscle of young men following short-term creatine monohydrate supplementation. *Physiol Genomics.* 2008;32(2):219–228.
- [134] Chilibeck PD, Kaviani M, Candow DG, Zello GA. Effect of creatine supplementation during resistance training on lean tissue mass and muscular strength in older adults: a meta-analysis. *Open Access J Sports Med.* 2017 Nov 2;8:213-226. doi: 10.2147/OAJSM.S123529. PMID: 29138605; PMCID: PMC5679696.
- [135] Sestili P, Martinelli C, Colombo E, et al. Creatine as an antioxidant. *Amino Acids.* 2011;40(5):1385–1396.
- [136] Rawson E.S., Volek J.S. Effects of Creatine Supplementation and Resistance Training on Muscle Strength and Weightlifting Performance. *J. Strength Cond. Res.* 2003;17:822–831. doi: 10.1519/00124278-200311000-00031.
- [137] Harris R.C., Söderlund K., Hultman E. Elevation of creatine in resting and exercised muscle of normal subjects by creatine supplementation. *Clin. Sci.* 1992;83:367–374. doi: 10.1042/cs0830367.

- [138] Kreider R.B., Kalman D.S., Antonio J., Ziegenfuss T.N., Wildman R., Collins R., Cando D.G., Kleiner S.M., Almada A.L., Lopez H.L. International Society of Sports Nutrition position stand: Safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine. *J. Int. Soc. Sports Nutr.* 2017;14:1–18. doi: 10.1186/s12970-017-0173-z.
- [139] Hultman E., Soderlund K., Timmons J.A., Cederblad G., Greenhaff P.L. Muscle creatine loading in men. *J. Appl. Physiol.* 1996;81:232–237. doi: 10.1152/jappl.1996.81.1.232.
- [140] Bembien M.G., Bembien D.A., Loftiss D.D., Knehans A.W. Creatine supplementation during resistance training in college football athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2001;33:1667–1673. doi: 10.1097/00005768-200110000-00009.
- [141] Cando DG, Forbes SC, Roberts MD, Roy BD, Antonio J, Smith-Ryan AE, Rawson ES, Gualano B, Roschel H. Creatine O'Clock: Does Timing of Ingestion Really Influence Muscle Mass and Performance? *Front Sports Act Living.* 2022 May 20;4:893714. doi: 10.3389/fspor.2022.893714. PMID: 35669557; PMCID: PMC9163789.
- [142] Cando D., Vogt E., Johannsmeyer S., Forbes S., Farthing J. (2015). Strategic creatine supplementation and resistance training in healthy older adults. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 40, 689–694. 10.1139/apnm-2014-0498
- [143] Vandenberghe K., Goris M., Van Hecke P., Van Leemputte M., Vangerven L., Hespel P. Long-term creatine intake is beneficial to muscle performance during resistance training. *J. Appl. Physiol.* 1997;83:2055–2063. doi: 10.1152/jappl.1997.83.6.2055.
- [144] Syrotuik D.G. et al. Acute creatine monohydrate supplementation : a descriptive physiological profile of responders vs. nonresponders. *J Strength Cond Res.* 2004 Aug;18(3):610-7
- [145] Gammone MA, Riccioni G, Parrinello G, D'Orazio N. Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids: Benefits and Endpoints in Sport. *Nutrients.* 2018 Dec 27;11(1):46. doi: 10.3390/nu11010046. PMID: 30591639; PMCID: PMC6357022.
- [146] Reid M.B. Nitric oxide, reactive oxygen species, and skeletal muscle contraction. *Med. Sci. Sports Exercise.* 2001;33:371–376. doi: 10.1097/00005768-200103000-00006.
- [147] Smith G.I., Atherton P., Reeds D.N., Mohammed B.S., Rankin D., Rennie M.J., Mittendorfer B. N-3 PUFA polyunsaturated fatty acids augment the muscle protein anabolic response to hyperinsulinaemia- hyperaminoacidaemia in healthy young and middle-aged men and women. *Clin. Sci.* 2011;121:267–278. doi: 10.1042/CS20100597.
- [148] Smith G.I., Julliard S., Reeds D.N., Sinacore D.R., Klein S., Mittendorfer B. Fish oil-derived n-3 PUFA therapy increases muscle mass and function in healthy older adults. *Am. J. Clin. Nutr.* 2015;102:115–122. doi: 10.3945/ajcn.114.105833.
- [149] Vaughan R.A., Garcia-Smith R., Bisoffi M., Conn C.A., Trujillo K.A. Conjugated linoleic acid or omega 3 fatty acids increase mitochondrial biosynthesis and metabolism in skeletal muscle cells. *Lipids Health Dis.* 2012;11:142.

- [150] Tipton K.D., Ferrando A.A., Phillips S.M., Doyle D., Wolfe R.R. Postexercise net protein synthesis in human muscle from orally administered amino acids. *Am. J. Physiol.* 1999;276:E628–E634.
- [151] Kamolrat T., Gray S.R. The effect of eicosapentaenoic and docosahexaenoic acid on protein synthesis and breakdown in murine C2C12 myotubes. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* 2013;432:593–598. doi: 10.1016/j.bbrc.2013.02.041.
- [152] Jouris K.B., McDaniel J.L., Weiss E.P. The effect of n-3 PUFA fatty acid supplementation on the inflammatory response to eccentric strength exercise. *J. Sports Sci. Med.* 2011;10:432–438.
- [153] Lembke P., Capodice J., Hebert K., Swenson T. Influence of n-3 omega-3 PUFA (n3) index on performance and wellbeing in young adults after heavy eccentric exercise. *J. Sports Sci. Med.* 2014;13:151–156.
- [154] Thielecke F, Blannin A. Omega-3 Fatty Acids for Sport Performance-Are They Equally Beneficial for Athletes and Amateurs? A Narrative Review. *Nutrients.* 2020 Nov 30;12(12):3712. doi: 10.3390/nu12123712. PMID: 33266318; PMCID: PMC7760705.
- [155] Harris W.S., Silveira S., Dujovne C.A. The combined effects of N-3 fatty acids and aspirin on hemostatic parameters in man. *Thromb. Res.* 1990;57:517–526. doi: 10.1016/0049-3848(90)90069-O.
- [156] Książek A, Zagrodna A, Słowińska-Lisowska M. Vitamin D, Skeletal Muscle Function and Athletic Performance in Athletes-A Narrative Review. *Nutrients.* 2019 Aug 4;11(8):1800. doi: 10.3390/nu11081800. PMID: 31382666; PMCID: PMC6722905
- [157] Ogan D, Pritchett K. Vitamin D and the athlete: risks, recommendations, and benefits. *Nutrients.* 2013 May 28;5(6):1856-68. doi: 10.3390/nu5061856. PMID: 23760056; PMCID: PMC3725481.
- [158] Wyon M.A., Koutedakis Y., Wolman R., Nevill A.M., Allen N. The influence of winter vitamin D supplementation on muscle function and injury occurrence in elite ballet dancers: A controlled study. *J. Sci. Med. Sport.* 2014;17:8–12. doi: 10.1016/j.jsams.2013.03.007
- [159] de la Puente Yagüe M, Collado Yurrita L, Ciudad Cabañas MJ, Cuadrado Cenxual MA. Role of Vitamin D in Athletes and Their Performance: Current Concepts and New Trends. *Nutrients.* 2020 Feb 23;12(2):579. doi: 10.3390/nu12020579. PMID: 32102188; PMCID: PMC7071499
- [160] Norman A.W. From vitamin D to hormone D: Fundamentals of the vitamin D endocrine system essential for good health. *Am. J. Clin. Nutr.* 2008;88:491S–499S. doi: 10.1093/ajcn/88.2.491S.
- [161] Cannell J.J., Hollis B.W., Sorenson M.B., Taft T.N., Anderson J.J. Athletic performance and vitamin D. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2009;41:1102–1110. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181930c2b.

- [162] Girgis C.M., Mokbel N., Cha K.M., Houweling P.J., Abboud M., Fraser D.R., Mason R.S., Clifton-Bligh R.J., Gunton J.E. The vitamin D receptor (VDR) is expressed in skeletal muscle of male mice and modulates 25-hydroxyvitamin D (25OHD) uptake in myofibers. *Endocrinology*. 2014;155:3227–3237. doi: 10.1210/en.2014-1016.
- [163] Angeline M.E., Gee A.O., Shindle M., Warren R.F., Rodeo S.A. The effects of vitamin D deficiency in athletes. *Am. J. Sports Med.* 2013;41:461–464. doi: 10.1177/0363546513475787
- [164] Ceglia L., Harris S.S. Vitamin D and its role in skeletal muscle. *Calcif. Tissue Int.* 2013;92:151–162. doi: 10.1007/s00223-012-9645-y.
- [165] Jastrzebska M., Kaczmarczyk M., Michalczyk M., Radziminski L., Stepien P., Jastrzebska J., Wakuluk D., Díaz Suárez A.D., López Sánchez G.F., Cieszczyk P., et al. Can supplementation of Vitamin D improve aerobic capacity in well trained youth soccer players? *J. Hum. Kinet.* 2018;61:63–72. doi: 10.2478/hukin-2018-0033.
- [166] Peter N., Black M.B., Scragg R. Relationship between serum 25-Hydroxyvitamin D and pulmonary function in the Third National Health and Nutrition Examination Survey. *Chest*. 2005;128:3792–3798.
- [167] Barker T., Henriksen V.T., Martins T.B., Hill H.R., Kjeldsberg C.R., Schneider E.D., Dixon B.M., Weaver L.K. Higher serum 25-hydroxyvitamin D concentrations associate with a faster recovery of skeletal muscle strength after muscular injury. *Nutrients*. 2013;4:1253–1275. doi: 10.3390/nu5041253.
- [168] Close G.L., Russell J., Copley J.N., Owens D.J., Wilson G., Gregson W., Fraser W.D., Morton J.P. Assessment of vitamin D concentration in non-supplemented professional athletes and healthy adults during the winter months in the UK: Implications for skeletal muscle function. *J. Sports Sci.* 2013;31:344–353. doi: 10.1080/02640414.2012.733822.
- [169] Carswell A.T., Oliver S.J., Wentz L.M., Kashi D.S., Roberts R., Tang J.C., Izzard R.M., Jackson S., Allan D., Rhodes L.E., et al. Influence of Vitamin D supplementation by sunlight or oral D3 on exercise performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 2018;50:2555–2564. doi: 10.1249/MSS.0000000000001721.
- [170] Wicinski M, Adamkiewicz D, Adamkiewicz M, Sniegocki M, Podhorecka M, Szychta P, Malinowski B. Impact of Vitamin D on Physical Efficiency and Exercise Performance-A Review. *Nutrients*. 2019 Nov 19;11(11):2826. doi: 10.3390/nu11112826. PMID: 31752277; PMCID: PMC6893541.
- [171] Holick M.F., Binkley N.C., Bischoff-Ferrari H.A., Gordon C.M., Hanley D.A., Heaney R.P., Murad M.H., Weaver C.M. Guidelines for preventing and treating vitamin D deficiency and insufficiency revisited. *J. Clin. Endocrinol. Metab.* 2012;97:1153–1158. doi: 10.1210/jc.2011-2601.
- [172] Hossein-nezhad A., Holick M.F. Vitamin D for health: A global perspective. *Mayo Clin. Proc.* 2013;88:720–755. doi: 10.1016/j.mayocp.2013.05.011.

- [173] Carlberg C. Nutrigenomics of Vitamin D. *Nutrients*. 2019;11:676. doi: 10.3390/nu11030676.
- [174] Holick M.F. The vitamin D epidemic and its health consequences. *J. Nutr.* 2005;135:2739S–2748S.
- [175] Maeda T, Hamada Y, Funakoshi S, Hoshi R, Tsuji M, Narumi-Hyakutake A, Matsumoto M, Kakutani Y, Hatamoto Y, Yoshimura E, Miyachi M, Takimoto H. Determination of Optimal Daily Magnesium Intake among Physically Active People: A Scoping Review. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*. 2022;68(3):189-203. doi: 10.3177/jnsv.68.189. PMID: 35768250
- [176] Zhang Y, Xun P, Wang R, Mao L, He K. Can Magnesium Enhance Exercise Performance? *Nutrients*. 2017 Aug 28;9(9):946. doi: 10.3390/nu9090946. PMID: 28846654; PMCID: PMC5622706.
- [177] Chen HY, Cheng FC, Pan HC, Hsu JC, Wang MF. Magnesium enhances exercise performance via increasing glucose availability in the blood, muscle, and brain during exercise. *PLoS One*. 2014 Jan 20;9(1):e85486. doi: 10.1371/journal.pone.0085486. PMID: 24465574; PMCID: PMC3896381.
- [178] Wang M.L., Chen Y.J., Cheng F.C. Nigari (deep seawater concentrate) enhances the treadmill exercise performance of gerbils. *Biol. Sport*. 2014;31:69–72. doi: 10.5604/20831862.1086735.
- [179] Santos D.A., Matias C.N., Monteiro C.P., Silva A.M., Rocha P.M., Minderico C.S., Bettencourt Sardinha L., Laires M.J. Magnesium intake is associated with strength performance in elite basketball, handball and volleyball players. *Magnes. Res*. 2011;24:215–219.
- [180] Brilla L.R., Haley T.F. Effect of Magnesium Supplementation on Strength Training in Humans. *J. Am. Coll. Nutr.* 1992;11:326–329. doi: 10.1080/07315724.1992.10718233
- [181] Garrison SR, Allan GM, Sekhon RK, Musini VM, Khan KM. Magnesium for skeletal muscle cramps. *Cochrane Database Syst Rev*. 2012 Sep 12;2012(9):CD009402. doi: 10.1002/14651858.CD009402.pub2. Update in: *Cochrane Database Syst Rev*. 2020 Sep 21;9:CD009402. PMID: 22972143; PMCID: PMC7025716.
- [182] Moslehi N., Vafa M., Sarrafzadeh J., Rahimi-Foroushani A. Does magnesium supplementation improve body composition and muscle strength in middle-aged overweight women? A double-blind, placebo-controlled, randomized clinical trial. *Biol. Trace Elem. Res*. 2013;153:111–118. doi: 10.1007/s12011-013-9672-1.
- [183] Bielik V, Kolisek M. Bioaccessibility and Bioavailability of Minerals in Relation to a Healthy Gut Microbiome. *Int J Mol Sci*. 2021 Jun 24;22(13):6803. doi: 10.3390/ijms22136803. PMID: 34202712; PMCID: PMC8268569.
- [184] <https://urgences-serveur.fr/intoxication-au-magnesium-mg.html>
- [185] Odell OJ, Wallis GA. The application of lactose in sports nutrition. *Int Dairy J*. 2021;116:104970.

- [186] Boets E, Gomand SV, Deroover L, Preston T, Vermeulen K, De Preter V, Hamer HM, Van den Mooter G, De Vuyst L, Courtin CM. Systemic availability and metabolism of colonic-derived short-chain fatty acids in healthy subjects: a stable isotope study. *J Physiol.* 2017;595(2):541–55.
- [187] Frampton J, Murphy KG, Frost G, Chambers ES. Short-chain fatty acids as potential regulators of skeletal muscle metabolism and function. *Nat Metab.* 2020;2(9):1–9.
- [188] Clark A, Mach N. Exercise-induced stress behavior, gut-microbiota-brain axis and diet: a systematic review for athletes. *J Int Soc Sports Nutr.* 2016 Nov 24;13:43. doi: 10.1186/s12970-016-0155-6. PMID: 27924137; PMCID: PMC5121944.
- [189] Jäger R, Mohr AE, Carpenter KC, Kerksick CM, Purpura M, Moussa A, Townsend JR, Lamprecht M, West NP, Black K, Gleeson M, Pyne DB, Wells SD, Arent SM, Smith-Ryan AE, Kreider RB, Campbell BI, Bannock L, Scheiman J, Wissent CJ, Pane M, Kalman DS, Pugh JN, Ter Haar JA, Antonio J. International Society of Sports Nutrition Position Stand: Probiotics. *J Int Soc Sports Nutr.* 2019 Dec 21;16(1):62. doi: 10.1186/s12970-019-0329-0. PMID: 31864419; PMCID: PMC6925426.
- [190] Minevich J, Olson M, Mannion J, Boublik J, McPerson J, Lowery R, Shields K, Sharp M, De Souza E, Wilson J, et al. Digestive enzymes reduce quality difference between plant and animal proteins: a double-blind crossover study (abstract) *J Int Soc Sports Nutr.* 2015;12:P26. doi: 10.1186/1550-2783-12-S1-P26.
- [191] Hughes RL, Holscher HD. Fueling Gut Microbes: A Review of the Interaction between Diet, Exercise, and the Gut Microbiota in Athletes. *Adv Nutr.* 2021 Dec 1;12(6):2190-2215. doi: 10.1093/advances/nmab077. PMID: 34229348; PMCID: PMC8634498.
- [192] Lee MC, Hsu YJ, Ho HH, Hsieh SH, Kuo YW, Sung HC, Huang CC. *Lactobacillus salivarius* Subspecies *salicinius* SA-03 is a New Probiotic Capable of Enhancing Exercise Performance and Decreasing Fatigue. *Microorganisms.* 2020 Apr 9;8(4):545. doi: 10.3390/microorganisms8040545. PMID: 32283729; PMCID: PMC7232535.
- [193] Georges J, Lowery R, Yaman G, Kerio C, Ormes J, McCleary S, Sharp M, Shields K, Rauch J, Silva J, et al. The effects of probiotic supplementation on lean body mass, strength, power, and health indicators in resistance trained males: a pilot study. *J Int Soc Sports Nutr.* 2014;11:P38. doi: 10.1186/1550-2783-11-S1-P38.

RESUME DE LA THESE EN FRANCAIS

Le sport est crucial pour le maintien d'une santé durable et apparaît en première ligne, conjointement à la nutrition, dans ce que nous appelons aujourd'hui les mesures hygiéno-diététiques dont la visée est la prévention de maladies chroniques. Elle peut être une habitude du quotidien, une activité qu'on se "force" à faire si l'on veut s'inscrire dans ce que nous appelons aujourd'hui le culte du "Healthy lifestyle" ou du "Wellness" mais lorsque cette pratique sportive devient une réelle passion, nous cherchons constamment à vouloir nous surpasser, monter le niveau d'un cran. C'est notamment ce à quoi de nombreux sportifs pratiquant de la musculation se sont confrontés. Ce qui, à l'origine, devait être une pratique pour simplement "se maintenir en forme" devient très vite une obsession du "gagner plus de muscle, de force et ce, en un minimum de temps". En effet, nous vivons dans une ère où l'on veut tout, et très vite. Dans cette optique, il apparaît clair que pour un gain de masse musculaire naturel dans un temps minimal, la composition de l'assiette est un élément majeur. Il n'y a pas de secret, une bonne alimentation favorise la prise de masse musculaire en dehors de la pratique mais elle permettrait aussi un gain de performances au moment même de la pratique. Mais comment s'y prendre ? En quelles quantités ? A quel moment ? Existe-t-il des compléments alimentaires à privilégier par rapport à d'autres en vue de cet objectif ? La nutrition du sportif de force devient alors tout un art, et comprendre l'utilité de chaque aliment que l'on peut retrouver dans son régime est crucial pour assurer un gain de masse musculaire significatif sans risquer une prise de masse grasseuse trop importante voire dangereuse pour la santé. Au cours de cette thèse, nous allons voir quels sont les points clés pour optimiser au mieux l'alimentation en vue d'accroître les performances au moment de la séance de musculation mais aussi pour un bon anabolisme lors de la période de repos. Bien évidemment, les performances sportives sont également affectées par les maux du quotidien, l'état d'esprit, le sommeil, etc... mais ce sont des points que j'ai volontairement choisi de ne pas traiter au sein de cette thèse. De même pour les méthodes "moins naturelles" et bien souvent détournés de leur usage initial qui existe actuellement sur le marché.

TITRE DE LA THESE EN ANGLAIS

OPTIMIZATION OF NUTRITION IN ORDER TO BUILDING MUSCLE MASS AND
INCREASING PERFORMANCE IN RESISTANCE TRAINING

PROPOSITION DE MOTS-CLES

Sport Nutrition – Resistance training – Protein – Carbohydrates – Lipids – mTORC1 – p70SK – MAPK – Bodybuilders – Leucine – Whey – Isolate whey – Soy – Casein – BCAA – Soy whey – HMB – Creatine – Omega 3 – Vitamin D – Magnesium – Probiotics – Bulking diet – Sports supplementation