

ACADÉMIE D'ORLÉANS-TOURS UNIVERSITÉ

DE TOURS

**FACULTE DE PHARMACIE «
Philippe-Maupas »**

Année : 2025-2026

N° 32

THÈSE D'EXERCICE

pour le

DIPLÔME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

Par

DOS SANTOS PINTO Hugo

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE

Vendredi 29 mai 2026

**Effets des compléments alimentaires disponibles en officine sur la résistance à la fatigue et la
récupération physique après des épreuves d'endurance**

JURY

**Président : Madame DEBIERRE-GROCKIEGO Françoise, Maître de Conférences-HDR,
Faculté de Pharmacie de Tours**

Membres :

**Monsieur BESSON Pierre, Maître de Conférences, Faculté de Pharmacie de Tours
Monsieur THIEFFRY Arthur, Pharmacien d'officine (Larçay, pharmacie Totum)
Monsieur AZOUGAGH Omar, Pharmacien d'officine (Montlouis sur Loire, pharmacie des
Bredins)**

ANNEE : 2025 - 2026

Directeur : Pr Denys BRAND

Directeur Adjoint : M. Matthieu JUSTE

**Assesseurs : M. Gildas PRIE, Mme Amélie FOUCAULT, Mme Emilie ALLARD-VANNIER,
M. Bruno GIRAUDEAU, Mme Claire POUPLARD, Mme Audrey OUDIN, Mme
GERMON Stéphanie**

ENSEIGNANTS

18 PROFESSEURS D'UNIVERSITÉ

ALLARD-VANNIER	Emilie	PHARMACIE GALENIQUE
ALLOUCHI	Hassan	CHIMIE PHYSIQUE
BOUDESOCQUE-DELAYE	Leslie	PHARMACOGNOSIE
BRAND	Denys	MICROBIOLOGIE
BRAIBANT	Martine	MICROBIOLOGIE
CHEVALIER	Stéphane	BIOCHIMIE GENERALE & BIOTHERAPIE
CHOURPA	Igor	CHIMIE ANALYTIQUE
CLASTRE	Marc	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
DENEVAULT	Caroline	CHIMIE THERAPEUTIQUE
DIMIER-POISSON	Isabelle	PARASITOLOGIE & MYCOLOGIE MEDICALES, IMMUNITE ANTI-
DUMAS	Jean-François	BIOCHIMIE GENERALE ET BIOTHERAPIE
ENGUEHARD-GUEIFFIER	Cécile	CHIMIE THERAPEUTIQUE
MAHEO	Karine	PHYSIOLOGIE
MAUPOIL-DAVID	Veronique	PHARMACOLOGIE
MUNNIER	Émilie	PHARMACIE GALENIQUE
TAUBER	Clovis	BIOPHYSIQUE & BIOINFORMATIQUE
VELGE-ROUSSEL	Florence	IMMUNOLOGIE PARASITAIRE
VIAUD-MASSUARD	Marie-Claude	CHIMIE ORGANIQUE

6 PROFESSEURS D'UNIVERSITÉ ET PRATICIENS HOSPITALIERS

ANTIER	Daniel	PHARMACIE CLINIQUE
ARLICOT	Nicolas	BIOPHYSIQUE & BIOINFORMATIQUE
EMOND	Patrick	BIOPHYSIQUE & BIOINFORMATIQUE
GIRAUDEAU	Bruno	SANTÉ PUBLIQUE, BIOSTATISTIQUE & ÉPIDÉMIOLOGIE
LANOTTE	Philippe	MICROBIOLOGIE
POUPLARD	Claire	HEMATOLOGIE

2 PROFESSEURS ÉMERITES

BARIN	Francis	MICROBIOLOGIE
THIBAULT	Gilles	IMMUNOLOGIE

31 MAITRES DE CONFÉRENCES

AUBREY	Nicolas	BIOCHIMIE GENERALE & BIOTHERAPIE
BESSON	Pierre	PHYSIOLOGIE
BIRER-WILLIAMS	Caroline	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
BONNIER (disponibilité)	Franck	CHIMIE ANALYTIQUE
BORDY	Romain	PHARMACOLOGIE & TOXICOLOGIE
BREDELOUX	Pierre	PHARMACOLOGIE
DAVID	Stéphanie	PHARMACIE GALENIQUE

DEBIERRE-GROCKIEGO	Françoise	PARASITOLOGIE & MYCOLOGIE MEDICALES, IMMUNITE ANTI-
DELAYE	Pierre-Olivier	CHIMIE THERAPEUTIQUE
DOUZIECH-EYROLLES	Laurence	AFFAIRE REGLEMENTAIRE ET MANAGEMENT DE LA QUALITE
GERMON	Stéphanie	PARASITOLOGIE & MYCOLOGIE MEDICALES, IMMUNITE ANTI-
GLEVAREC	Gaëlle	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
HERVE-AUBERT	Katel	CHIMIE ANALYTIQUE
JUSTE	Matthieu	PARASITOLOGIE & MYCOLOGIE MEDICALES, IMMUNITE ANTI-
LAJOIE	Laurie	IMMUNOLOGIE
LANNOY	Damien	GALENIQUE
LANOUE	Arnaud	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
MARC	Jillian	BIOMOLECULES ET BIOTECHNOLOGIES VEGETALES
MAVEL	Sylvie	CHIMIE THERAPEUTIQUE
LOUDIN	Audrey	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
POUPET	Cyril	BIOLOGIE CELLULAIRE & BIOCHIMIE VEGETALE
PASQUALIN	Côme	PHARMACOLOGIE
PRIE	Gildas	CHIMIE ORGANIQUE
SAHLI	Ramla	PHARMACOGNOSIE
SIEROCKI	Pierre	CHIMIE ORGANIQUE
SOUCE	Martin	CHIMIE ANALYTIQUE
VERCOUILLIE	Johnny	BIOPHYSIQUE & BIOINFORMATIQUE
VERGER	Alexis	PHARMACIE GALENIQUE
VERGOTE	Jackie	AFFAIRE REGLEMENTAIRE ET MANAGEMENT DE LA QUALITE
VIERRON	Emilie	SANTÉ PUBLIQUE, BIOSTATISTIQUE & ÉPIDÉMIOLOGIE
ZHANG	Bei-Li	PHARMACOLOGIE

1 MAST

CAMUS GABRIEL	Mathilde	<i>Filière Officine</i>
---------------	----------	-------------------------

1 EAST

CHOTTIN SENECHAL	Emilie Olivier	<i>Pharmacologie</i> <i>Pharmacologie</i>
---------------------	-------------------	--

5 MAITRES DE CONFÉRENCES ET PRATICIENS HOSPITALIERS

FOUCAULT-FRUCHARD	Laura	PHARMACIE CLINIQUE
FOUCAULT	Amélie	HEMATOLOGIE
MARLET	Julien	MICROBIOLOGIE
POUPIN	Pierre	SANTÉ PUBLIQUE, BIOSTATISTIQUE & ÉPIDÉMIOLOGIE
VEYRAT DUREBEX	Charlotte	BIOCHIMIE CLINIQUE

3 AHU (Assistant Hospitalier Universitaire)

BOULARD	Pierre	IMMUNOLOGIE
DOUEZ	Emmanuel	PHARMACIE GALENIQUE
TULOUP	Vianney	PHARMACIE CLINIQUE

2 ATER

DUSSART	Romain	CHIMIE ANALYTIQUE
PIATELLI	Emma	MICROBIOLOGIE - BACTERIOLOGIE

1 PRAG

WALTERS-GALOPIN	Susan	ANGLAIS
-----------------	-------	---------

1 CONTRAT D'ENSEIGNEMENT

THIERNEY	Mégane	ANGLAIS
----------	--------	---------

3 CHARGÉS DE RECHERCHE

EPARDAUD	Mathieu	INRAE
MEVELEC	Marie-Noëlle	INRAE
MOIRE	Nathalie	INRAE



SERMENT DE GALIEN

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

D'honorer ceux qui m'ont instruit(e) dans les préceptes de mon art et de leur témoigner ma reconnaissance en restant fidèle aux principes qui m'ont été enseignés et d'actualiser mes connaissances ;

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

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers la personne humaine et sa dignité ;

En aucun cas, je ne consentirai à utiliser mes connaissances et mon état pour corrompre les mœurs et favoriser des actes criminels ;

De ne dévoiler à personne les secrets qui m'auraient été confiés ou dont j'aurais eu connaissance dans l'exercice de ma profession ;

De faire preuve de loyauté et de solidarité envers mes collègues pharmaciens ;

De coopérer avec les autres professionnels de santé ;

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

Date : Vendredi 29 mai 2026

L'étudiant

DOS SANTOS PINTO Hugo

Le Doyen de la Faculté

Professeur Denys BRAND

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à Mr Besson, mon directeur de thèse. Je lui suis reconnaissant pour son accompagnement, ses conseils et sa disponibilité tout au long de ce travail. Sa rigueur et son exigence ont été une source d'inspiration et un moteur pour mener à bien ces recherches.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury de cette thèse pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer cette thèse. Je les remercie également pour le temps qu'ils m'ont accordé et qu'ils ont passé à lire ma thèse.

Je remercie également l'équipe officinale de la pharmacie des Bredins pour vos conseils, vos encouragements et vos sourires qui rendent le travail agréable même en période de rush.

A mes amis (Tom, Samuel, Arthur, Alexandre, Nawfel, Maël, Abdallah, Lucas, Jeremy, Sylvain, Soline, Aurele et Loïc) qui ont partagés tout mon cursus, merci pour les rires, les sorties, les activités sportives (petite mention à Arthur et Samuel qui m'accompagnaient à la piscine avant le lever du soleil). Merci à vous pour votre bonne humeur constante et tous ses moments passés ensembles.

A ma famille et belle famille, un grand merci pour votre soutien, votre présence et votre confiance en moi. L'assurance de votre présence en cas de besoin me permet d'initier et d'avancer dans mes projets sans me retourner.

Un grand merci à mes deux acolytes, Arnaud et Simon qui sont présents à mes côtés depuis des années dans tous mes projets. Merci pour l'amitié sincère dont vous faites part et pour toutes les aventures que l'on a vécus ensemble.

A Iziah, merci d'être à mes côtés depuis 6 années maintenant. Merci de croire dans chacun de mes projets même quand ils sont fous. Merci pour ta tendresse, ton amour, la confiance que tu as en moi. Juste merci pour les moments passés avec toi.

Mes plus grands remerciements se feront à mes parents et mon frère. Un grand merci pour l'éducation que vous m'avez donnée, vos sacrifices, vos encouragements et votre amour. Rien de ce que j'ai accompli n'aurait été possible sans vous. Ce travail c'est aussi le vôtre.

Table des matières

I. Listes des abréviations / figures / tableaux :.....	10
Abréviations	10
Liste des figures	11
Liste des tableaux	11
II. Introduction	12
III. Les fondements théoriques et réglementaires.....	13
3.1. Définition et cadre réglementaire des compléments alimentaires	13
3.1.1. Définition des compléments alimentaires	13
3.1.2. Différences entre compléments alimentaires et médicaments	16
3.1.3. Réglementation en France et en Europe	17
3.1.4. Les allégations nutritionnelles et de santé	18
IV. Les différents types de sportifs.....	19
4.1. Définition et caractéristiques des sports d'endurance.....	20
V. Les différents types de fibres musculaires	20
VI. Les systèmes physiologiques impliqués	21
6.1. Système cardio-respiratoire.....	21
6.2. Filières énergétiques	24
6.3. La fatigue et ses sources	28
VII. Rôle des compléments alimentaires dans la performance et la récupération	30
7.1. Objectifs et enjeux de la supplémentation.....	30
7.2. Les macronutriments énergétiques.....	31
7.2.1. Glucides : différents types, effets selon le moment de la consommation	31
7.2.2. Protéines : types, rôles dans la récupération et la synthèse musculaire.....	38
7.2.3. Lipides : sources énergétiques secondaires et recommandations	42
7.3. Acides aminés et métabolisme musculaire	43
7.3.1. BCAA : rôle, efficacité, recommandations	43
7.3.2. Glutamine : effets physiologiques et controverses	44
7.4. Électrolytes et pertes liées à l'effort.....	46
7.4.1. Magnésium : rôles, indications et risques	48
7.4.2. Potassium et sodium	49
7.5. Fer et vitamines du groupe B	50
7.5.1. Importance du fer et du statut martial chez les sportifs	50
7.5.2. Vitamines B1 à B12 : métabolisme énergétique et performances	52
7.6. Antioxydants et autres oligoéléments	56
7.6.1. Vitamines C et E : effets antioxydants et immunitaires.....	56
7.6.2. Polyphénols non-flavonoïdes et flavonoïdes : récupération et inflammation	58
7.6.3. Zinc, cuivre, sélénium : protection cellulaire et récupération	60
7.7. Caféine	63
VIII. Risques de dopage involontaire et conséquences encourues pour les athlètes dopés	

8.1.	Mécanismes et prévalence du dopage involontaire	64
8.1.1.	Contamination croisée industrielle.....	64
8.1.2.	Contamination frauduleuse	65
8.1.3.	Sources à risque majeur.....	65
8.2.	Substances principales impliquées dans le dopage et risques associés	65
8.2.1.	Stimulants	65
8.2.2.	Stéroïdes anabolisants	67
8.2.3.	Diurétiques	67
8.3.	Principe fondamental du code mondial antidopage	67
8.4.	Justification éthique et pratique	68
8.5.	Sanctions disciplinaires graduées.....	68
8.6.	Sanctions complémentaires.....	69
8.7.	Conséquences Financières et Contractuelles.....	70
8.7.1.	Perte immédiate de revenus	70
8.7.2.	Résiliation des contrats de parrainage publicitaire	70
8.7.3.	Difficultés de reconversion professionnelle	70
8.8.	Impact Social et Psychologique	70
8.8.1.	Stigmatisation sociale et isolement	70
8.9.	Conséquences pénales et civiles	71
8.9.1.	Sanctions pénales en France.....	71
8.9.2.	Responsabilité civile et indemnisations.....	71
8.10.	Difficultés de recours et défense	71
8.10.1.	Charge de la preuve inversée	71
8.10.2.	Coûts financiers des procédures.....	72
8.11.	Prévention et protection	72
8.11.1.	Importance des labels anti-dopage	72
8.11.2.	Rôle des professionnels de santé	72
8.12.	Perspectives d'évolution.....	73
8.12.1.	Amélioration des méthodes de détection	73
8.12.2.	Renforcement de la traçabilité	73
IX.	<i>Le rôle du Pharmacien dans l'accompagnement des sportifs d'endurance.....</i>	74
9.1.	Fondements et légitimité de l'intervention pharmaceutique	74
9.1.1.	Assise Réglementaire et Déontologique.....	74
9.1.2.	Accessibilité et Proximité Unique	74
9.2.	Évaluation pharmaceutique et clinique personnalisée	75
9.2.1.	Évaluation pharmaceutique spécialisée	75
9.2.2.	Conciliation médicamenteuse	75
9.2.3.	Analyse pharmaceutique des interactions	76
9.3.	Prévention multidimensionnelle des risques	76
9.3.1.	Prévention du dopage involontaire	76
9.3.2.	Prévention de la surconsommation et de la iatrogénie.....	77
9.3.3.	Pharmacovigilance et nutrivigilance active	78
9.4.	Conseil nutritionnel et optimisation de la performance	78
9.4.1.	Expertise en nutrition sportive	78
9.4.2.	Personnalisation des protocoles nutritionnels	79
9.5.	Collaboration interprofessionnelle et coordination des soins.....	80
9.5.1.	Intégration dans l'équipe médicale	80

9.6.	Nouvelles missions et évolutions du métier	80
9.6.1.	Entretiens pharmaceutiques spécialisés.....	80
9.6.2.	Promotion de l'activité physique	81
9.7.	Formation continue et expertise professionnelle	81
9.7.1.	Cursus de formation spécialisée	81
9.7.2.	Veille scientifique et réglementaire.....	82
9.7.3.	Optimisation du rapport coût-efficacité	82
X.	Conclusion.....	83
XI.	Références bibliographiques.....	84
XII.	Annexes.....	100
12.1.	Annexe 1 : Allégations de santé validées par l'EFSA (tiré de (13)).....	100
	NB : les documents qui suivent ont été réalisé par moi-même suite au travail de cette thèse .	103
12.2.	Annexe 2 : questionnaire structuré d'évaluation du sportif d'endurance et arbre décisionnel	103
	Exemples de patients :	106
12.3.	Annexe 3 : plan nutrition, effort de 1h ou moins.....	110
12.4.	Annexe 4 : plan nutrition, effort entre 1 h et 2 h.....	111
12.5.	Annexe 5 : plan nutrition, effort de plus de 2h.....	112
12.6.	Annexe 6 : guide de nutrition glucidique des différents produits phares des marques les plus populaires dans les sports d'endurance	113
12.7.	Annexe 7 : guide de nutrition des différents produits phares de récupération des marques les plus populaires dans les sports d'endurance	114

I. Listes des abréviations / figures / tableaux :

Abréviations par ordre alphabétique

- AFLD : agence Française de Lutte contre le Dopage
- AMA : agence mondiale antidopage
- ANSES : agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
- AS : apport satisfaisant
- AUC : area under the curve
- BCAA : Branched-Chain Amino Acids (acides aminés à chaîne ramifiée)
- DOMS : delayed onset muscle soreness
- EFA : équivalents folates alimentaires
- EN : équivalent niacine
- LSS : limite supérieure de sécurité
- MJ : mégajoule
- mTor : mammalian target of rapamycin
- NAP : niveau d'activité physique
- NCM : Nordic Council of Ministers (instance de référence nordique pour la nutrition)
- NHS : National Health Service
- OMS : organisation mondiale de la santé
- Pi : phosphate inorganique
- RNP : références nutritionnelles pour la population
- SNS : système nerveux sympathique
- VMA : vitesse maximale aérobie
- VO2max : volume d'oxygène maximal

Liste des figures

Figure 1 : Évolution de la consommation maximale d'oxygène (VO_2) en fonction du temps lors d'efforts à intensité croissante	21
Figure 2 : Le concept d'effet de croisement (crossover concept).....	24
Figure 3. Comparaison de l'utilisation des substrats énergétiques entre un athlète d'endurance et un individu modérément actif en fonction de l'intensité de l'exercice.....	27
Figure 4 : Influence de l'indice glycémique des aliments sur l'évolution de la glycémie postprandiale	33
Figure 5 : Exemples de différents monosaccharides.....	34
Figure 6 : Exemples de structure de différents disaccharides.....	34
Figure 7 : Structure de différents oligosaccharides.....	35
Figure 8 : Structure de différents polysaccharides.....	35
Figure 9: Recommandations d'apports glucidiques lors de l'exercice selon sa durée	37
Figure 10 : Influence de l'intensité de l'exercice et des conditions environnementales sur le débit sudoral.....	47

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau comparatif des différents types de protéines	41
Tableau 2 : Référence nutritionnelle des vitamines du groupe B pour la population adulte..	55
Tableau 3: Référence nutritionnelle du zinc pour la population en fonction de l'apport alimentaire en phytates	61

II. Introduction

Les sports d'endurance se distinguent par des efforts prolongés qui exigent une utilisation soutenue des systèmes énergétiques et une gestion efficace des ressources physiologiques. Des disciplines comme la course à pied, le cyclisme, le triathlon ou encore la natation de longue distance demandent la capacité de maintenir un effort intense sur une longue durée. Toutefois, ces efforts de haute intensité soumettent le corps à des contraintes importantes telles que la fatigue, le stress oxydatif et la perte d'électrolytes. Si ces facteurs ne sont pas correctement régulés, ils peuvent nuire aux performances et à la récupération des athlètes.

En effet, la fatigue liée aux sports d'endurance (qu'elle soit physique ou mentale) résulte de plusieurs causes, notamment l'épuisement des réserves énergétiques, les déséquilibres électrolytiques, l'inflammation et le stress oxydatif. Ces éléments réduisent la disposition de l'athlète à maintenir un effort prolongé et peuvent entraîner des blessures ou une baisse de performance si des mesures de récupération ne sont pas mises en place.

Dans ce contexte, les compléments alimentaires sont souvent perçus comme des alliés précieux pour augmenter la résistance à la fatigue, optimiser les performances et faciliter la récupération après l'effort.

Cette thèse se propose d'examiner les compléments alimentaires les plus couramment utilisés dans les sports d'endurance, en se concentrant sur leur rôle dans la prévention de la fatigue et l'amélioration de la récupération. Nous évaluerons également les limites de leur efficacité, les preuves scientifiques existantes, ainsi que les risques, tant sur le plan de la santé que du point de vue réglementaire, notamment en ce qui concerne les risques de dopage involontaire.

Ainsi, cette étude vise à éclairer les enjeux liés à l'utilisation des compléments alimentaires dans les sports d'endurance, tout en soulignant l'importance d'une approche individualisée et sécurisée. Le rôle des pharmaciens, en tant que conseillers et accompagnateurs des sportifs, sera aussi mis en avant.

III. Les fondements théoriques et réglementaires

3.1. Définition et cadre réglementaire des compléments alimentaires

3.1.1. Définition des compléments alimentaires

Selon la directive 2002/46/CE du parlement européen, les compléments alimentaires se définissent comme des : « *denrées alimentaires dont le but est de compléter le régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique seuls ou combinés, commercialisés sous forme de doses, à savoir les formes de présentation telles que les gélules, les pastilles, les comprimés, les pilules et autres formes similaires, ainsi que les sachets de poudre, les ampoules de liquide, les flacons munis d'un compte-gouttes et les autres formes analogues de préparations liquides ou en poudre destinées à être prises en unités mesurées de faible quantité* »(1).

L'ANSES (L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail est un établissement public français. Elle a pour mission principale d'évaluer les risques sanitaires dans les domaines de l'alimentation, de l'environnement et du travail, en vue d'éclairer la décision publique), définit le régime alimentaire normal comme étant une « *alimentation équilibrée et diversifiée couvrant l'ensemble des besoins nutritionnels de la population générale* » (2). L'ANSES dit aussi qu'un régime normal doit couvrir les besoins nutritionnels qui sont définis comme étant « *la quantité de nutriments (ou d'énergie) nécessaire pour assurer l'entretien, le fonctionnement métabolique et physiologique d'un individu en bonne santé, comprenant les besoins liés à l'activité physique et la thermorégulation* »(2). D'après le Cerin (Centre de Recherche et d'Information Nutritionnelles, un organisme privé de la filière laitière française qui a pour mission de diffuser des informations scientifiques fiables en nutrition et santé, destinées aux professionnels de santé, chercheurs et décideurs), les besoins énergétiques journaliers moyens sont de (3) :

- 2600 kcal par jour pour les hommes âgés de 18 à 69 ans
- 2100 kcal par jour les femmes âgées de 18 à 59 ans

Sur le plan individuel, les besoins énergétiques ne peuvent pas se résumer à ces valeurs moyennes, car ils dépendent de plusieurs paramètres propres à chaque sujet, notamment l'âge, le sexe, le poids, la taille, la composition corporelle et le niveau d'activité physique. Pour cette raison, la dépense énergétique journalière est classiquement estimée en deux étapes. Le métabolisme de base est calculé à l'aide d'équations prédictives qui prennent en compte au minimum le poids, la taille, l'âge et le sexe. Parmi ces équations, la formule de Mifflin-St Jeor est aujourd'hui largement utilisée, car elle fournit une estimation du métabolisme de base plus précise que la formule historique de Harris-Benedict chez l'adulte.

Dans un second temps, le métabolisme de base est multiplié par un coefficient reflétant le niveau d'activité physique (NAP), ce qui permet d'obtenir la dépense énergétique journalière totale. Les valeurs de NAP varient généralement d'environ 1,4 pour un mode de vie sédentaire à plus de 2,0 chez les sujets très actifs, notamment les sportifs d'endurance. Cette approche méthodologique permet de relier les recommandations générales à une estimation individualisée des besoins énergétiques, mieux adaptée à la pratique clinique et à la réalité des sportifs.

De plus la répartition recommandée des apports énergétiques est la suivante(3):

- 50 – 55 % de glucides
- 30 – 35 % de lipides
- 10 – 15 % de protéines

Le terme « normal » dans la définition européenne des compléments alimentaires apparaît insuffisamment défini et potentiellement questionnable.

Dans une perspective physiologique, les besoins nutritionnels sont étroitement corrélés aux dépenses énergétiques. Un sportif d'endurance présente des besoins caloriques et énergétiques significativement supérieurs à ceux d'un individu sédentaire. Or, si l'augmentation des apports énergétiques s'accompagne d'une alimentation diversifiée et équilibrée, l'apport en micronutriments augmente mathématiquement de façon proportionnelle. En théorie, un régime quantitativement adapté et qualitativement équilibré devrait donc couvrir l'ensemble des besoins nutritionnels sans nécessiter de supplémentation systématique(4,5). Cette logique questionne directement l'idée selon laquelle un « régime normal » serait intrinsèquement insuffisant et devrait être complété.

La formulation retenue par la directive peut ainsi être perçue comme problématique : elle semble implicitement postuler que le régime alimentaire habituel des populations est incomplet ou inadapté, sans interroger les causes structurelles de cette éventuelle inadéquation. Or, si l'alimentation contemporaine est effectivement caractérisée, dans certains contextes, par une densité nutritionnelle amoindrie (ultra-transformation, appauvrissement des sols, déséquilibres alimentaires)(6,7), la question fondamentale ne serait-elle pas alors d'améliorer la qualité du régime alimentaire plutôt que d'envisager sa complémentation comme solution première ? Il ne s'agit pas de remettre en cause l'intérêt de certaines supplémentations ciblées. C'est notamment le cas chez les sportifs d'endurance, les femmes enceintes, les personnes âgées ou les personnes présentant une carence objectivée.

En revanche, la définition légale des compléments alimentaires mérite d'être discutée. Elle repose sur la notion d'« état nutritionnel normal », qu'il faut replacer dans son contexte nutritionnel, social et économique. L'enjeu n'est donc pas de contester l'existence des compléments alimentaires, mais de questionner le cadre dans lequel ils sont pensés et justifiés.

Dans une approche pharmaceutique rigoureuse, il est nécessaire de distinguer deux situations. D'une part, les déficits avérés, qui justifient une correction ciblée. D'autre part, des usages plus larges, qui relèvent surtout d'une compensation implicite des limites du modèle alimentaire contemporain.

Cette distinction permet d'adopter une posture scientifique et professionnelle responsable, fondée sur une analyse critique plutôt que sur une adhésion automatique aux catégories juridiques existantes.

3.1.2. Différences entre compléments alimentaires et médicaments

Les compléments alimentaires sont souvent associés à tort aux médicaments. Il est donc nécessaire de faire la distinction entre les deux.

Tout d'abord, ils se différencient par leur usage.

Selon l'article L5111-1, un médicament se définit comme : « *toute substance ou composition présentée comme possédant des propriétés curatives ou préventives à l'égard des maladies humaines, ainsi que toute substance ou composition pouvant être utilisée chez l'homme ou pouvant lui être administrée, en vue d'établir un diagnostic médical ou de restaurer, corriger ou modifier ses fonctions physiologiques en exerçant une action pharmacologique, immunologique ou métabolique.* » (8). Les médicaments sont définis comme des substances ou compositions destinées à prévenir, diagnostiquer ou traiter une maladie, et sont encadrés par une autorisation de mise sur le marché délivrée au regard de leur efficacité et de leur sécurité. À l'inverse, les compléments alimentaires sont des denrées alimentaires dont le but est de compléter un régime alimentaire dit « normal », et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique, sans visée thérapeutique.

En théorie, une alimentation variée et équilibrée devrait couvrir l'ensemble des besoins en nutriments. En pratique, plusieurs facteurs expliquent le recours aux compléments : apports insuffisants dans certains groupes de population (par exemple, vitamine D, fer, folates), contraintes alimentaires ou culturelles, modes de vie qui limitent la qualité nutritionnelle de l'alimentation, mais aussi besoins accrus dans des situations particulières comme la grossesse, le vieillissement ou la pratique intensive d'un sport d'endurance. L'intérêt des compléments ne réside donc pas dans la substitution à une alimentation équilibrée, mais dans la correction ou la prévention de déficits spécifiques lorsque l'adaptation de l'alimentation seule est difficile ou insuffisante.

Les deux catégories se distinguent également par leur composition et leur mode de présentation. Les compléments alimentaires apportent des vitamines, minéraux, plantes ou extraits de plantes, acides gras, acides aminés ou autres substances à effet nutritionnel ou physiologique, parfois associés à des excipients alimentaires, alors que les médicaments contiennent en plus un ou plusieurs principes actifs à visée thérapeutique ou diagnostique, associés à des excipients pharmaceutiques.

Sur le plan galénique, les compléments alimentaires doivent être « commercialisés sous forme de doses », c'est-à-dire présentés de façon à être consommés en unités mesurées (comprimés, gélules, pastilles, sachets de poudre, ampoules, flacons compte-gouttes, mesurette, etc.), et sont exclusivement destinés à une administration par voie orale. Un pot de poudre de protéines de lactosérum de 1 kg entre ainsi dans ce cadre dès lors que l'étiquetage précise une portion mesurée (par exemple une cuillère doseuse) correspondant à la dose quotidienne recommandée.

3.1.3. Réglementation en France et en Europe

Au niveau européen, c'est la directive 2002/46/CE (1) qui constitue la base légale en ce qui concerne les compléments alimentaires contrairement aux médicaments dont le cadre juridique est fixé par la directive 2001/83/CE (9). Cette directive les définit comme nous l'avons vu précédemment. Mais elle impose également des règles aux fabricants autour de la sécurité des produits, de l'étiquetage ou encore de la notification.

Tout d'abord, d'un point de vue sécurité, une liste positive des nutriments (10) pouvant composer les compléments alimentaires apparaît dans la directive. Ainsi, seuls les vitamines, minéraux ou leurs dérivés figurant dans cette liste peuvent entrer dans la composition des compléments commercialisés en Europe. De plus, la France, dans l'arrêté du 24 juin 2014, a émis une liste positive de plantes et racines pouvant figurer dans les compléments alimentaires (11). D'autre part, les fabricants doivent respecter des règles strictes en matière d'étiquetage, ne doivent pas induire en erreur le consommateur et ont l'interdiction de mettre en avant des propriétés thérapeutiques. Les fabricants peuvent informer les consommateurs en valorisant les propriétés de leur produit grâce aux allégations que nous expliciterons dans la partie 3.1.4. Étant des denrées alimentaires, les compléments alimentaires sont également soumis au règlement européen (CE) n°1169/2011 (12). Cette directive 2002/46/CE (1) ne prévoit pas d'autorisation préalable de mise sur le marché comme l'AMM pour les médicaments. Les médicaments, en vue d'être commercialisés, doivent obtenir une autorisation de mise sur le marché qui nécessite des preuves d'efficacité, de sécurité et de qualité rigoureuse, là où les compléments alimentaires n'en n'ont pas besoin.

Cet étiquetage doit obligatoirement comporter certains points :

- Le nom du produit
- L'inscription complément alimentaire
- La liste complète des ingrédients, avec, pour chaque ingrédient actif, les apports journaliers recommandés en quantité et en pourcentage
- La portion journalière de produit recommandée
- Des avertissements : « ne pas dépasser la dose journalière recommandée » ; « tenir hors de portée des enfants » et « les compléments alimentaires ne doivent pas se substituer à un régime alimentaire varié »
- Le nom et adresse du fabricant
- Le numéro de lot
- La date de durabilité minimale
- La quantité nette des ingrédients
- Les conditions de conservation
- Les informations spécifiques pour l'usage de certains ingrédients tels que la caféine

L'étiquetage peut également comporter des allégations s'il y en a mais ce n'est pas obligatoire.

3.1.4. Les allégations nutritionnelles et de santé

Les allégations des compléments alimentaires sont des mentions qui informent sur les avantages nutritionnels, physiologiques ou encore sur les effets positifs du complément sur la santé. Ces allégations sont importantes pour les industries puisqu'elles jouent un rôle majeur dans le choix fait par le consommateur. Cependant, pour éviter toute dérive ou information trompeuses, ces allégations sont strictement réglementées.

Selon le règlement (CE) n° 1924/2006 du parlement européen et du conseil (13), il existe deux types d'allégations relatives aux compléments alimentaires :

- Les allégations nutritionnelles : elles mettent en avant un nutriment ou une substance, on retrouve par exemple : « riche en vitamine C ».
- Les allégations de santé : elles indiquent les effets positifs d'un nutriment sur les fonctions de l'organisme. On peut par exemple citer « contribue au fonctionnement normal du système immunitaire ».

En revanche, on ne peut pas utiliser n'importe quelle allégation. Celles-ci doivent être basées sur des faits scientifiques et doivent soit figurer sur la liste établie et approuvée par l'autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) pour les allégations de santé (voir Annexe 1), soit être inscrites au règlement CE 1924/2006.

Pour finir, les allégations ne doivent pas :

- Suggérer qu'un produit aide à traiter, guérir ou prévenir une maladie
- Inciter à la consommation en induisant un sentiment de peur au consommateur ; par exemple une allégation ne peut pas sous-entendre la survenue d'une maladie si l'on ne consomme pas tel ou tel complément.

IV. Les différents types de sportifs

En France, les sportifs sont classés en différentes catégories selon leur degré d'implication. Le sportif de haut niveau correspond, au sens légal, à toute personne inscrite sur les listes établies par le ministère en charge des Sports, préparant les grandes compétitions internationales (Jeux olympiques, championnats d'Europe ou du monde) (14). Concrètement, seuls les athlètes sélectionnés en équipe nationale pour ce type d'épreuves obtiennent ce statut (par exemple, un champion olympique), indépendamment de leur carrière professionnelle en club. À l'opposé, le non-sportif, ou individu physiquement inactif, est celui qui n'atteint pas le seuil des 150 minutes d'activité physique modérée par semaine, seuil retenu par les autorités sanitaires (L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et le Programme national nutrition santé (PNNS) constituent des cadres de référence majeurs en matière de politiques nutritionnelles et de santé publique) pour prévenir les effets de la sédentarité (15).

Entre ces deux extrêmes se situent les sportifs amateurs réguliers, parfois qualifiés de niveau intermédiaire. Ils s'entraînent de manière hebdomadaire, souvent dans un cadre associatif ou en club, et atteignent au minimum les recommandations officielles de 150 à 300 minutes d'activité physique par semaine. Les enquêtes de l'Insee mettent également en évidence un « noyau dur » d'environ 20% d'adultes pratiquant intensivement, la plupart licenciés dans un club, ainsi qu'un groupe de pratiquants plus occasionnels (environ 15 %). Ces derniers se consacrent à une ou deux disciplines sportives au cours de l'année, mais de manière irrégulière et sans véritable planification ni entraînement structuré (16).

4.1. Définition et caractéristiques des sports d'endurance

Les sports d'endurance se définissent par de longs efforts continus. On retrouve par exemple des sports tels que le cyclisme, le triathlon, le ski de fond, la course de fond ou encore la natation d'endurance. Comme pour les autres disciplines sportives, les sports d'endurance sollicitent principalement trois grands ensembles de fonctions :

- le système cardio-respiratoire ;
- les filières énergétiques de production d'ATP (filières anaérobie lactique et aérobie, reposant sur les stocks de glycogène et de triglycérides) ;
- le système neuromusculaire.

V. Les différents types de fibres musculaires

Chez l'humain, les fibres musculaires squelettiques sont classées en trois grands groupes selon l'isoforme de myosine qu'elles expriment et leurs propriétés contractiles et métaboliques (17)

- Fibres de type I : également appelées fibres lentes, elles se caractérisent par une vitesse de contraction réduite mais une endurance élevée. Elles possèdent une forte densité mitochondriale, une concentration importante de myoglobine et un réseau capillaire développé. Leur métabolisme repose majoritairement sur la phosphorylation oxydative, ce qui leur permet de soutenir un effort prolongé avec une bonne efficacité énergétique (17,18).
- Fibres de type IIa : considérées comme intermédiaires, elles associent une contraction rapide à une résistance à la fatigue plus modérée. Elles disposent de capacités oxydatives et glycolytiques, leur permettant de produire à la fois de la puissance et une endurance relative. Cette double aptitude en fait des fibres polyvalentes, mobilisables aussi bien lors d'efforts soutenus que lors de phases nécessitant davantage d'intensité (17,18).
- Fibres de type IIx : ces fibres, à contraction très rapide, sont spécialisées dans les efforts explosifs et de courte durée. Leur densité mitochondriale est faible, leur teneur en myoglobine réduite, et elles s'appuient surtout sur la glycolyse anaérobie pour produire de l'énergie. Elles génèrent une grande puissance mécanique, mais s'épuisent rapidement en raison de leur faible capacité oxydative (17,18).

VI. Les systèmes physiologiques impliqués

6.1. Système cardio-respiratoire

Ce système est primordial dans le sport et donc aussi dans les efforts de longue durée. On utilise le volume d'oxygène maximal ($\dot{V}O_{2\max}$), qui permet d'évaluer la capacité maximale aérobie, comme l'un des principaux critères d'évaluation pour les sports d'endurance. Le $\dot{V}O_{2\max}$ explore la fonction du système cardio-respiratoire car il représente la capacité du corps à transporter et utiliser l'oxygène pendant un effort prolongé. Afin d'évaluer ce volume, il existe 2 grandes méthodes :

- La méthode directe se fait en laboratoire à l'aide d'un spiromètre qui analyse la teneur en oxygène de l'air expiré. Le sportif s'installe alors sur un tapis de course ou un vélo et effectue un effort progressif jusqu'à observer un plateau de la consommation du volume d'oxygène grâce au spiromètre. Ce plateau correspond alors à son $\dot{V}O_{2\max}$ comme le montre la figure 1 (19).

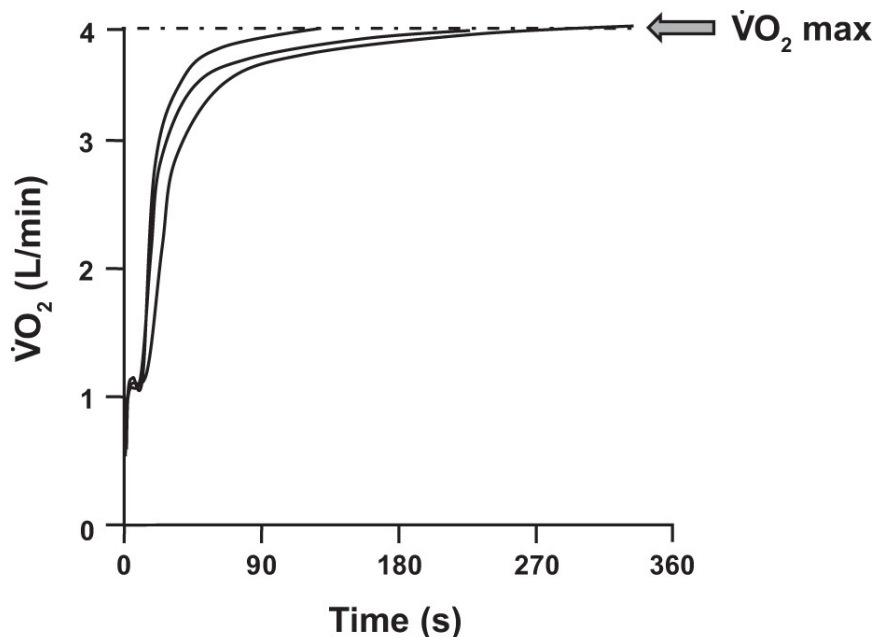


Figure 1 : Évolution de la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) en fonction du temps lors d'efforts à intensité croissante

Les trois courbes représentent des exercices réalisés à des intensités correspondant respectivement à 115 % (gauche), 110 % (centre) et 105 % (droite) de la puissance maximale aérobie de l'athlète, illustrant l'impact de l'augmentation de l'intensité de l'effort sur la cinétique du $\dot{V}O_2$ (tirée de 13).

- La méthode indirecte dite de terrain. Le sportif effectue un test de VMA (vitesse maximale aérobie). Le test le généralement réalisé est le test de Cooper qui consiste à courir la plus grande distance possible sur 12 minutes. À la suite de ce test, le sportif connaîtra sa VMA qu'il pourra multiplier par 3,5 pour obtenir son VO_2 max.

La mesure directe de la VO_2 max par spirométrie constitue la méthode de référence pour l'évaluation de la capacité aérobie maximale, dans la mesure où elle repose sur l'analyse directe des échanges gazeux respiratoires lors d'un effort maximal. Cette approche permet une quantification précise de la consommation d'oxygène et une validation physiologique de l'atteinte de la VO_2 max, notamment par l'observation d'un plateau de VO_2 malgré l'augmentation de la charge de travail (voir Figure 1). En ce sens, elle présente une validité physiologique et une reproductibilité excellentes, ce qui explique son utilisation privilégiée en recherche et en milieu clinique (20,21). En revanche elle nécessite des matériels spécifiques, est plus difficile à réaliser et plus coûteuse que les méthodes de terrain. Un test de VO_2 max évalue surtout la capacité aérobie, mais au fur et à mesure que l'intensité devient très élevée, la contribution anaérobie augmente également. C'est précisément l'intérêt du test maximal, qui explore la limite entre ces deux voies énergétique.

À l'inverse, les méthodes indirectes de terrain, telles que les tests de VMA, reposent sur des équations de prédiction permettant d'estimer la VO_2 max à partir de la performance physique réalisée. Bien que ces tests présentent une corrélation modérée à élevée avec les valeurs mesurées en laboratoire, ils ne constituent qu'une approximation de la capacité aérobie réelle. Cette approximation peut conduire à une sur-estimation ou à une sous-estimation de la VO_2 max, avec une tendance fréquente à la surestimation lorsque l'on est sur des sujets entraînés. Cette dérive s'explique en partie par la contribution des métabolismes anaérobies : si le sujet court un test de VMA à une intensité supérieure à sa vitesse aérobie maximale, une fraction non négligeable de l'énergie provient de la glycolyse anaérobie, ce qui permet de réaliser une meilleure performance malgré une VO_2 max inchangée et conduit alors à une surestimation de la capacité aérobie lorsqu'on applique une équation basée uniquement sur la distance et/ou la vitesse. À l'inverse, une allure trop prudente, une motivation insuffisante ou des contraintes environnementales peuvent conduire à une sous-estimation. En pratique, ces tests de terrain conservent l'avantage d'être simples, peu coûteux et facilement applicables, mais doivent être interprétés comme des estimations approximatives, dont la

validité dépend du protocole utilisé (test de Cooper, test de Vameval ou test de Luc Leger) et du profil d'entraînement des sportifs évalués (20,21).

Avec l'entraînement, on peut observer des adaptations cardio-vasculaires telles que l'augmentation de la capacité cardiaque, avec une fréquence cardiaque maximale à l'effort qui augmente et une fréquence cardiaque au repos qui diminue. On peut également constater une meilleure circulation sanguine et donc un meilleur apport en oxygène et en nutriments pour les muscles et aussi un développement du ventricule gauche qui permet l'augmentation du volume d'éjection systolique et du débit cardiaque (22,23). On observe aussi une augmentation des capacités pulmonaires et de l'efficacité des échanges gazeux avec l'entraînement (24,25).

6.2. Filières énergétiques

Il existe de nombreuses façons de produire de l'énergie pour notre organisme. Ici, nous allons nous intéresser au métabolisme aérobie qui est essentiel pour maintenir l'effort. Il est caractérisé par un phénomène métabolique connu sous le nom de « crossover effect » en anglais que l'on nommera « effet de croisement » dans cette thèse. L'effet de croisement est défini par la transition entre l'usage majoritaire des lipides pour des exercices d'intensité faible et moyenne et celui des glucides lors d'une augmentation croissante de l'intensité de l'exercice comme cela est illustré dans la Figure 2 (26).

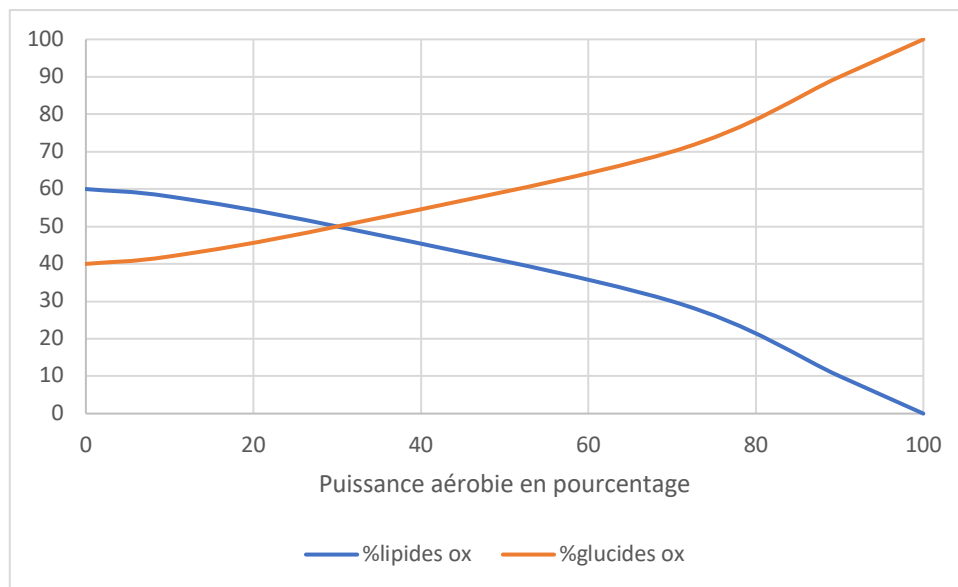


Figure 2 : Le concept d'effet de croisement (crossover concept).

Augmentation relative de l'énergie issue de l'utilisation des glucides (CHO) et diminution de celle provenant de l'oxydation des lipides en fonction de la puissance relative. Au point de croisement, les hausses d'intensité exercent une dépendance accrue aux glucides et moindre aux lipides. L'entraînement endurance décale les courbes d'utilisation des substrats vers des intensités plus élevées (droite sur l'échelle de puissance). SNS stimulation : stimulation du système nerveux sympathique. Image modifiée par pierre besson d'après (26).

Sur ce graphique, on observe qu'au repos et à faible intensité, c'est-à-dire en dessous de 30% du VO_2max , le métabolisme énergétique repose essentiellement sur l'oxydation des lipides (plus précisément des acides gras libres) afin de produire de l'énergie. L'oxydation des acides gras a lieu principalement dans les mitochondries des cellules musculaires après relargage et transports des réserves d'acides gras. Les acides gras libres plasmatiques représentent une source majeure d'énergie, particulièrement lors d'exercices d'intensité faible à modérée.

Lorsque l'on se rapproche d'une intensité modérée c'est-à-dire entre 60-65 % de VO_2max , les triglycérides intramusculaires constituent une source énergétique locale mais les glucides sont devenus la source énergétique principales (27–29).

En revanche, lorsque l'intensité de l'exercice devient plus importante (au-dessus de 80 % de VO_2max) l'utilisation des glucides est nettement privilégiée. Dès le début de l'effort s'accompagne d'une élévation progressive des concentrations plasmatiques de catécholamines (adrénaline et noradrénaline), qui activent principalement les récepteurs β_1 et β_2 -adrénergiques couplés aux protéines Gs dans le tissu adipeux, stimulant ainsi la lipase hormono-sensible et la lipolyse aux faibles et moyennes intensités d'exercice (c'est-à-dire dans une zone située entre 30 et 65% pourcent de VO_2max selon le niveau d'entraînement de l'individu). À des intensités plus élevées (au-delà de 65% de VO_2max), l'activation concomitante des récepteurs α_2 -adrénergiques couplés aux protéines Gi exerce un effet antilipolytique qui contrebalance la stimulation β -adrénergique, limite la mobilisation des acides gras à partir des triglycérides du tissu adipeux et contribue à la diminution des acides gras libres plasmatiques observée lors d'exercices proches de 75–85 % de la VO_2max (30–34). Parallèlement, l'accumulation de lactate liée à l'augmentation de la glycolyse active le récepteur GPR81 (HCAR1) des adipocytes, ce qui diminue la production d'AMPc, inhibe la lipase hormono-sensible et réduit à la fois la mobilisation des acides gras et leur entrée dans la mitochondrie en modulant l'activité de la carnitine-palmitoyl-transférase 1 et de la β -oxydation (30,35,36). Enfin, aux intensités très élevées et lors d'efforts courts et intenses, le recrutement préférentiel des fibres musculaires de type II, caractérisées par une forte capacité glycolytique et une capacité d'oxydation lipidique plus limitée que les fibres de type I, renforce la dépendance vis-à-vis du glycogène musculaire comme substrat énergétique principal (37–39).

Plusieurs facteurs peuvent influencer et déplacer le point de croisement entre la contribution des lipides et des glucides lors de l'effort. L'entraînement d'endurance induit des adaptations biochimiques musculaires (augmentation du nombre de mitochondries, des enzymes oxydatives et des capacités de β -oxydation, ainsi qu'une diminution de la réponse sympathique pour une même charge d'exercice) qui favorisent une plus grande utilisation des lipides à intensité donnée et déplacent le point de croisement vers des pourcentages plus élevés de VO_2 max comme le montre la figure 3 en comparant l'effet de croisement d'un sportif professionnel à un individu sain modérément actif (40–42). Ces adaptations permettent une épargne relative du glycogène musculaire au cours de l'exercice prolongé, et plusieurs travaux montrent qu'une meilleure préservation des réserves glucidiques est associée à un report de la survenue de la fatigue lors d'efforts d'endurance, même si la fatigue résulte de mécanismes multiples et ne peut être réduite au seul épuisement des substrats énergétiques.(40,43).

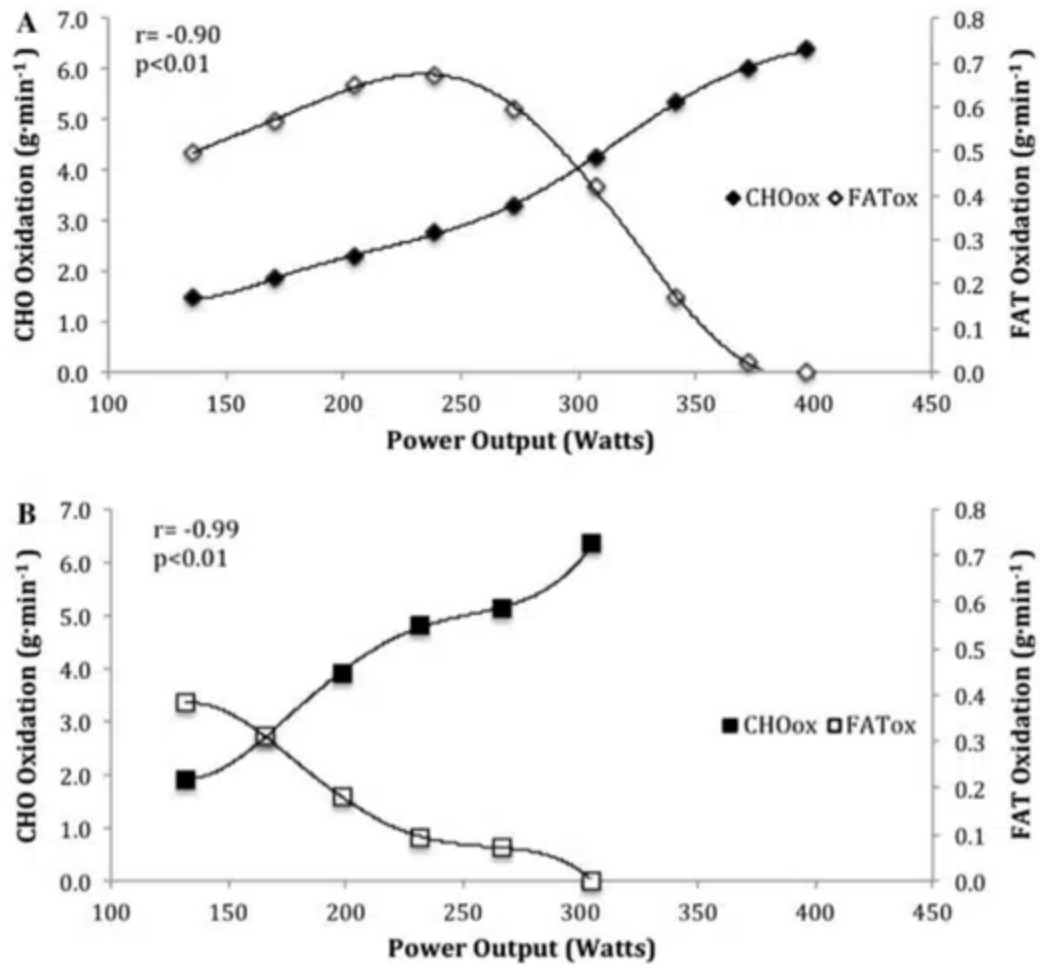


Figure 3. Comparaison de l'utilisation des substrats énergétiques entre un athlète d'endurance et un individu modérément actif en fonction de l'intensité de l'exercice

Oxydation des glucides (CHOox) et des lipides (FATox) en fonction de l'intensité de l'exercice (puissance en watts) chez (A) un athlète d'endurance de niveau professionnel et (B) un individu sain modérément actif. CHOox (carbohydrate oxidation) correspond à l'oxydation des glucides, tandis que FATox (fat oxidation) correspond à l'oxydation des lipides pour la production d'ATP. On observe que le point de croisement entre l'utilisation majoritaire des lipides et celle des glucides survient à une intensité plus faible chez l'individu modérément actif, indiquant un recours plus précoce aux glucides lorsque l'intensité augmente. À l'inverse, chez l'athlète d'endurance, ce croisement se produit à une intensité plus élevée, traduisant une capacité accrue à utiliser les lipides à des intensités d'exercice plus importantes. Image tirée de (28)

6.3. La fatigue et ses sources

Que l'on soit un athlète de haut niveau ou un amateur, la fatigue est une composante essentielle des sports d'endurance. En effet, elle joue un rôle majeur dans la performance et le risque de blessures.

La fatigue peut être définie comme une diminution réversible, induite par l'exercice, de la capacité à produire ou à maintenir la force ou la puissance requise pour une tâche donnée, accompagnée d'une augmentation de la perception de l'effort nécessaire et de sentiments de lassitude qui peuvent diminuer la motivation à poursuivre l'exercice (44,45).

On distingue classiquement deux formes de fatigue. La fatigue centrale correspond à des altérations des mécanismes neurochimiques qui réduisent la commande motrice volontaire et s'accompagnent souvent de sensations croissantes de pénibilité, de lassitude et de sentiments négatifs pouvant diminuer la volonté de poursuivre l'effort. La fatigue périphérique renvoie aux perturbations locales au niveau neuromusculaire qui diminuent la capacité des fibres musculaires à produire la force attendue. Tout d'abord, la fatigue centrale est due à l'augmentation ou la diminution du taux de plusieurs neurotransmetteurs tels que la sérotonine, la dopamine et la noradrénaline. Une augmentation de l'activité sérotoninergique cérébrale a été proposée comme l'un des mécanismes possibles de la fatigue et de la somnolence lors d'un effort prolongé. La sérotonine étant impliquée dans la régulation du sommeil, de la vigilance et de la motivation, une hausse de sa synthèse centrale pourrait favoriser l'apparition de sensations de léthargie et une baisse de la performance. Cette hypothèse s'appuie sur le fait que le tryptophane, précurseur de la sérotonine, partage avec les acides aminés branchés (BCAA) le même transporteur au niveau de la barrière hémato-encéphalique. Pendant l'exercice prolongé, l'augmentation de la lipolyse élève les concentrations d'acides gras libres dans le plasma, ce qui favorise le déplacement du tryptophane de l'albumine et augmente sa fraction libre. Parallèlement, la concentration de BCAA tend à diminuer, ce qui augmente le rapport tryptophane libre/BCAA. Cette modification du rapport facilite l'entrée du tryptophane dans le cerveau, où il peut accroître la synthèse de sérotonine, contribuant potentiellement à des sensations de somnolence et à une diminution de la vigilance en fin d'effort (46–49).

Les neurotransmetteurs impliqués dans le système de la récompense qui sont la dopamine et la noradrénaline jouent un rôle important dans la perception de la fatigue. En effet, lorsque la quantité de ces neurotransmetteurs diminue, on observe une baisse de la motivation et une augmentation de la pénibilité de l'effort (46,50).

La fatigue périphérique est notamment due à l'accumulation de métabolites dans le muscle squelettique (tels que les lactates, les ions hydrogène, le phosphate inorganique ou encore les espèces réactives de l'oxygène) et à la déplétion des substrats énergétiques. Ces métabolites influent directement ou indirectement sur les processus biochimiques et physiologiques impliqués dans la contraction musculaire. Premièrement, lors d'un effort intense, on a la production de lactate accompagnée d'une libération d'ions H^+ . Le lactate peut même s'accumuler si l'effort intense se prolonge. L'augmentation des concentrations d'ions H^+ conduit à une acidose musculaire et *in fine* à l'inhibition de la phosphofructokinase, essentielle à la glycolyse. On aura donc une diminution de la production d'ATP (51). Deuxièmement, l'hydrolyse de l'ATP en ADP produit du phosphate inorganique (P_i). Lors de l'effort, il y a une accumulation de P_i au niveau musculaire. Avec cette accumulation, on observera une diminution de la force générée par chaque fibre musculaire puisque le P_i inhibe en partie la formation des ponts actine-myosine (52). On aura également une précipitation du P_i avec le calcium dans le réticulum sarcoplasmique, réduisant ainsi les concentrations en calcium et donc l'efficacité du couplage excitation-contraction nécessaire à la contraction musculaire (53). Toutefois, cette augmentation de P_i est transitoire : les systèmes de resynthèse de l'ATP (système phosphocréatine, glycolyse et phosphorylation oxydative) rephosphorylent l'ADP et consomment une partie du P_i accumulé, ce qui contribue à rétablir l'équilibre énergétique intracellulaire. Au cours de la récupération, la diminution de la concentration de P_i libre favorise la redissolution des complexes $Ca-P_i$ dans le réticulum sarcoplasmique, la restauration du contenu en Ca^{2+} disponible et, *in fine*, la normalisation progressive du couplage excitation-contraction et de la capacité de production de force musculaire (54–57). Troisièmement, les espèces réactives de l'oxygène produites lors de l'effort peuvent endommager les phospholipides membranaires, les enzymes et les protéines contractiles, exacerbant ainsi la fatigue musculaire (58).

La déplétion des substrats énergétiques tels que les glucides ou les lipides va jouer un rôle majeur dans la survenue de la fatigue lors d'un effort d'endurance. Lors d'un effort de haute intensité et prolongé, le glycogène musculaire va être utilisé par les muscles pour produire de

l'énergie. Cependant, les réserves de glycogène étant limitées, elles vont s'épuiser, entraînant la survenue de fatigue et donc la diminution de la performance, il va donc falloir pallier à ces réserves faibles en consommant des glucides lors de l'effort (59).

Les athlètes d'endurance, à force de s'entraîner, développent des adaptations spécifiques qui modifient l'expression de ces mécanismes de fatigue. L'entraînement régulier accroît la densité mitochondriale, améliore la capacité oxydative, augmente la clairance du lactate et des ions H⁺, et renforce la capacité tampon de pH musculaire. Ces adaptations permettent de maintenir un pH intramusculaire plus élevé et de retarder l'accumulation de métabolites (ions H⁺, lactate, phosphate inorganique) lors d'efforts soutenus réalisés à la même intensité relative, par exemple au même pourcentage de VO₂ max ou de puissance maximale aérobie. Par ailleurs, l'amélioration de l'économie de mouvement et de la coordination neuromusculaire avec l'entraînement diminue le coût énergétique et la production de métabolites pour une même puissance mécanique externe, ce qui limite encore la perturbation métabolique pour un effort donné (60).

VII. Rôle des compléments alimentaires dans la performance et la récupération

7.1. Objectifs et enjeux de la supplémentation

Les compléments alimentaires ont une place centrale dans l'amélioration de la performance sportive d'endurance puisque cette dernière nécessite des exigences physiques et métaboliques élevées. Ainsi, les compléments alimentaires vont avoir trois objectifs principaux :

- Amélioration de la performance
- Réduction de la fatigue lors de l'effort
- Accélération de la récupération

Pour les pharmacies d'officine, les compléments alimentaires présentent des enjeux importants : l'importance du pharmacien dans l'accompagnement du sportif, le choix de produits de qualité et sécurisés. Cela représente aussi un enjeu économique pour la pharmacie.

NB : Nous aborderons à présent les différents nutriments. Il convient de souligner que ces derniers interviennent dans un grand nombre de réactions physiologiques au sein de l'organisme humain. Toutefois, dans le cadre de cette thèse, l'analyse sera volontairement limitée aux mécanismes et hypothèses physiologiques dont l'impact est observable chez le sportif d'endurance. L'analyse sera également limitée aux nutriments que l'on retrouve communément dans les compléments alimentaires destinés aux sportifs d'endurance.

Quand cela est nécessaire, j'ai fait le choix de comparer les recommandations françaises à celles du Royaume-Uni. J'ai fait ce choix parce que d'une part, le Royaume-Uni constitue un pays géographiquement proche et partageant un contexte sanitaire et nutritionnel comparable à celui de la France. D'autre part, sa sortie de l'Union européenne en fait un cadre réglementaire distinct, permettant d'analyser comment un pays voisin encadre les compléments alimentaires en dehors du système réglementaire européen. Cette comparaison offre ainsi un éclairage pertinent sur les similitudes et divergences dans l'utilisation des compléments alimentaires destinés aux sportifs.

7.2. Les macronutriments énergétiques

7.2.1. Glucides : différents types, effets selon le moment de la consommation

Les glucides jouent un rôle essentiel dans la performance mais également dans la récupération. Ce rôle est d'autant plus crucial chez les sportifs d'endurance qui sollicitent leur métabolisme énergétique de manière intensive.

Tout d'abord, nous pouvons classer les glucides de deux façons, selon leur vitesse d'assimilation ou selon leur structure. Leur structure conditionne en grande partie leur vitesse de digestion et d'absorption.

Une façon de classer les glucides est de se baser sur leur vitesse d'assimilation. Ainsi, pour pouvoir les classer de cette manière, on utilise l'indice glycémique qui mesure l'impact d'un glucide sur la glycémie, en prenant en compte sa vitesse d'hydrolyse digestive et d'absorption intestinale qui sont elles-mêmes influencées par les autres aliments ingérés et la complexité du bol alimentaire. L'indice glycémique est une échelle allant de 0 à 100, avec 100 caractérisant une absorption et une augmentation de la glycémie identiques à celles provoquées par l'ingestion de 50 grammes de glucose pur (61). Cette échelle se détermine grâce à un calcul d'aire sous la courbe (AUC). Pour ce faire, on donne à des sujets volontaires

en bonne santé et à jeun depuis 10 heures 50 grammes de glucose pur. Après cette ingestion, on mesure la glycémie des sujets à intervalles de temps réguliers (par exemple toutes les 15 min) pendant 2h (cette durée standard peut être prolongée en cas de nécessité, jusqu'à obtenir un retour à la normale de la glycémie) afin de tracer la courbe de glycémie et d'obtenir l'aire sous la courbe de l'aliment de référence (le glucose pur). Quelques jours plus tard, les sujets reviennent une nouvelle fois à jeun et consomment cette fois l'aliment à tester en quantité suffisante pour atteindre les 50 grammes de glucides. La glycémie est mesurée de la même façon à intervalles réguliers pendant 2h (cette durée standard peut être prolongée en cas de nécessité). On obtient donc l'aire sous la courbe de l'aliment à tester. Par la suite, on va comparer celle-ci à l'aire sous la courbe de l'aliment de référence afin d'obtenir l'indice glycémique.

$$\text{Indice glycémique} = \frac{\text{AUC de l'aliment testé}}{\text{AUC du glucose}} \times 100$$

On distinguera les indices glycémiques élevés, modérés et bas :

- Indice glycémique élevé (> 70%) → aliments, compléments alimentaires qui contiennent des glucides ayant une absorption rapide et provoquent une augmentation brutale de la glycémie. Cette augmentation brutale peut causer une hypoglycémie réactionnelle comme le montre la figure 4 Cette hypoglycémie réactionnelle s'explique par le fait que lorsqu'un sucre à indice glycémique élevé est consommé il provoque une élévation rapide et importante de la glycémie. Cette hyperglycémie aiguë déclenche une sécrétion massive d'insuline et excessive par rapport à la quantité de glucides ingérés. On a donc une hyperinsulinémie réactionnelle qui entraîne une chute trop importante et trop rapide de la glycémie.
- Indice glycémique modéré (entre 55% et 70%) → aliments, compléments alimentaires qui provoquent une libération de glucose plus progressive et donc de manière plus durable avec un impact moins important sur la glycémie, c'est-à-dire avec un pic d'hyperglycémie moins élevé et donc une hypoglycémie réactionnelle plus faible.
- Indice glycémique bas (< 55%) → la digestion et l'absorption des glucides sont lentes et ont donc *in fine* un faible impact sur la glycémie. En effet, l'augmentation de la glycémie va être modérée après l'ingestion de l'aliment ce qui permet d'éviter

l'hypoglycémie réactionnelle. La libération d'énergie se fera donc sur une plus longue période. On va donc épargner une partie du glycogène musculaire (62).

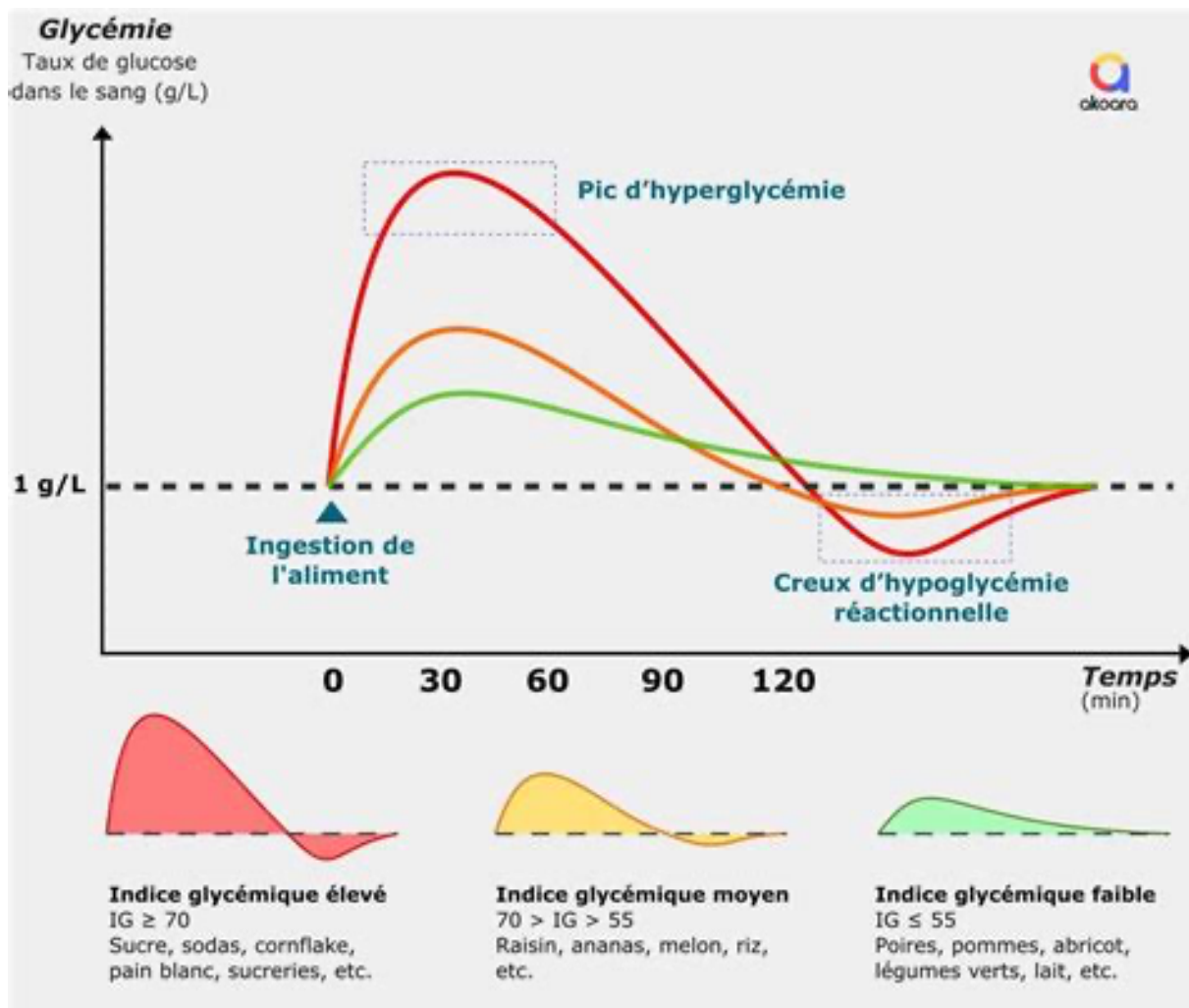


Figure 4 : Influence de l'indice glycémique des aliments sur l'évolution de la glycémie postprandiale

Évolution de la glycémie après l'ingestion d'un aliment à indice glycémique (IG) élevé, modéré ou faible. Un IG élevé entraîne un pic d'hyperglycémie rapide suivi d'une hypoglycémie réactionnelle plus marquée. À l'inverse, un IG faible induit une élévation plus progressive et stable de la glycémie sans hypoglycémie réactionnelle. La ligne en pointillés correspond à la glycémie moyenne normale de référence (~ 1 g/L). Tiré de (63)

Si l'on classe les glucides d'après leur structure, on peut les classer en-deux groupes de glucides : d'un côté les glucides simples qui sont rapidement absorbés par l'organisme et de l'autre les glucides complexes qui ont une digestion plus lente ce qui ralentit la disponibilité des glucides ingérés.

Les glucides simples sont des sucres de petites tailles moléculaires tels que les monosaccharides (glucose, fructose, galactose) (voir la figure 5) ou les disaccharides (saccharose, lactose, maltose) (voir la figure 6). On peut retrouver ces glucides dans les fruits, le miel ou encore dans certains compléments alimentaires comme les gels ou les barres énergétiques ou encore dans les boissons isotoniques. Du fait de leur petite taille, ils sont soit directement absorbés au niveau intestinal (glucose, fructose, galactose), soit, dans le cas des disaccharides, très rapidement hydrolysés en monosaccharides qui sont alors absorbés. Ainsi ce type de glucide est à privilégier pour des besoins énergétiques immédiats (64).

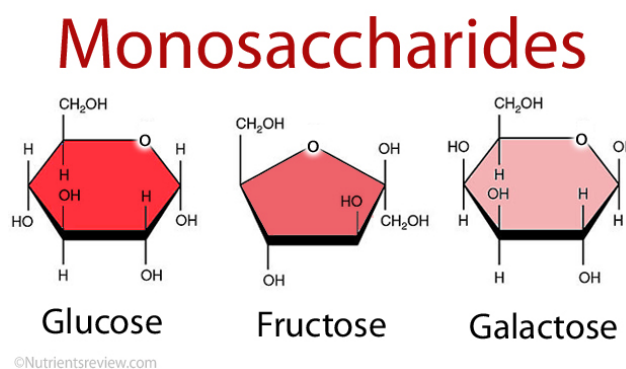


Figure 5 : Exemples de différents monosaccharides
Figure tirée de (65)

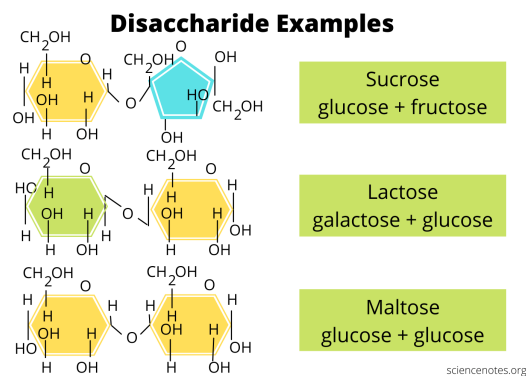


Figure 6 : Exemples de structure de différents disaccharides
Sucrose (en anglais) désigne le saccharose. Figure tirée de (65)

Les glucides complexes regroupent les oligosaccharides composés de 3 à 10 monosaccharides dans leur chaîne (par exemple le raffinose et le stachyose) (voir Figure 7) et les polysaccharides contenant plus de 10 monosaccharides (par exemple l'amylose) (voir la figure 8). Du fait de leur longue taille, nous les digérons plus lentement que les disaccharides puisqu'ils nécessitent une dégradation enzymatique plus longue et plus complexe. On aura donc une libération lente et progressive dans le sang des monosaccharides qui les composent, ce qui limite le risque d'hypoglycémie réactionnelle. On peut les retrouver par exemple dans les aliments riches en amidon comme les pommes de terre ou les céréales. On les retrouve également dans les compléments alimentaires comme les gels ou les barres énergétiques. Ainsi, ce type de glucides permet de maintenir des niveaux d'énergie plus stables pendant l'effort et de favoriser la reconstitution des stocks de glycogène en amont de l'épreuve, notamment lorsqu'il est consommé la veille de celle-ci afin de limiter le risque d'hypoglycémie

réactionnelle (64). Les stocks en glycogène peuvent être constitués ou reconstitués en 24h après l'effort que ce soit au niveau hépatique ou musculaire (4,66)

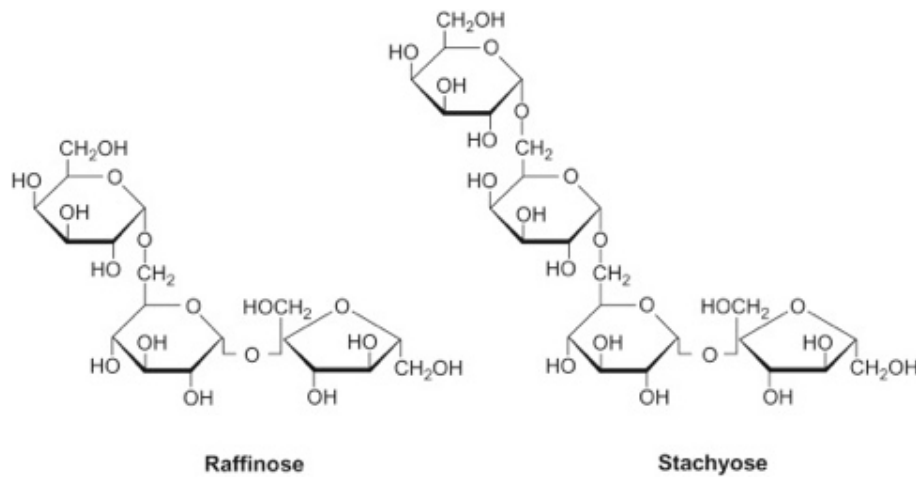


Figure 7 : Structure de différents oligosaccharides
Figure tirée de (65)

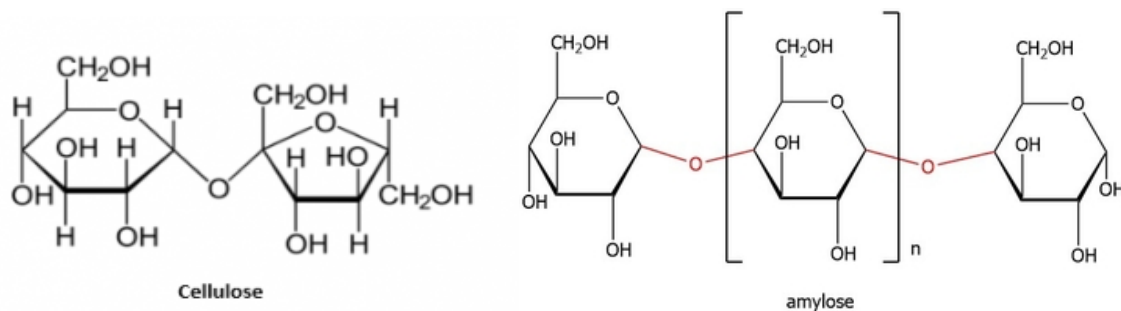


Figure 8 : Structure de différents polysaccharides
Figure tirée de (65)

Ainsi le choix du type de glucides et du moment auquel on va le consommer est primordial dans la performance.

Comme nous l'avons vu précédemment, lors d'efforts supérieurs à 30% du VO_{2max} , la source énergétique principale vient des glucides (donc principalement du glycogène). Cependant, ces réserves de glycogène ne sont pas illimitées et finissent par être épuisées au bout de 90 à 120 minutes, ce qui diminue grandement la performance (67–69).

Ainsi une bonne gestion des apports en glucides est primordiale dans la résistance et la récupération à la fatigue et donc dans la performance. Il sera donc essentiel d'augmenter ses réserves de glycogène avant l'effort.

Pour ce faire, une alimentation riche en glucides peut être instaurée avant l'effort afin de favoriser la restauration des réserves de glycogène, généralement en 24 à 48 heures, ou sur plusieurs jours dans le cadre d'une surcharge glucidique selon les besoins (70). La sélection des glucides doit tenir compte de leur indice glycémique (IG) et de leur composition. Les glucides complexes complets (pâtes complètes, riz complet) présentent un IG plus faible que leurs équivalents raffinés en raison de la présence de fibres qui ralentissent l'hydrolyse des polysaccharides et réduisent la vitesse d'absorption intestinale, et limitent ainsi les pics glycémiques. On peut alors consommer des glucides complexes plutôt que des glucides à assimilation rapide, pour éviter une augmentation rapide puis une chute réactionnelle de la glycémie (71,72).

La consommation de glucides lors de l'effort dépend de sa durée. Pour des efforts inférieurs à une heure, l'eau avec un tout petit apport en glucides pourra suffire comme illustré dans la figure 9. En revanche pour des efforts de plus d'une heure il faudra un apport en glucides plus important pour éviter l'épuisement des réserves glucidiques. Ces apports de glucides lors de l'effort doivent provenir de glucides simples afin d'avoir une absorption rapide des sucres et donc de l'énergie rapidement (73).

Il a été montré que la quantité de glucides qu'il faudrait consommer pendant l'effort, ainsi que leur nature, pour maintenir une bonne performance, dépend de la durée de l'effort. Pour les efforts prolongés, l'intérêt de combiner plusieurs glucides transportables, notamment le glucose et le fructose, est de contourner la limitation d'absorption observée lorsque le glucose est apporté seul à forte dose. En effet, le glucose est principalement absorbé via SGLT1 (Sodium/glucose cotransporter 1), tandis que le fructose emprunte majoritairement GLUT5 (Glucose transporter 5). Leur co-ingestion permet ainsi d'augmenter la quantité totale de glucides absorbés et d'améliorer l'apport énergétique pendant l'effort, tout en pouvant réduire le risque de troubles digestifs (74–76).

Il est donc suggéré de consommer préférentiellement de mélange glucose/fructose (plutôt que de glucose seul) à raison de 60 grammes par heure pour les efforts entre 2 et 3 heures et une consommation de 90 grammes par heure, en utilisant uniquement des mélanges de glucides (notamment un mélange fructose, glucose) et jamais de glucose pur, pour les efforts supérieurs à 2,5 heures comme illustré sur la figure 9 (73,77).

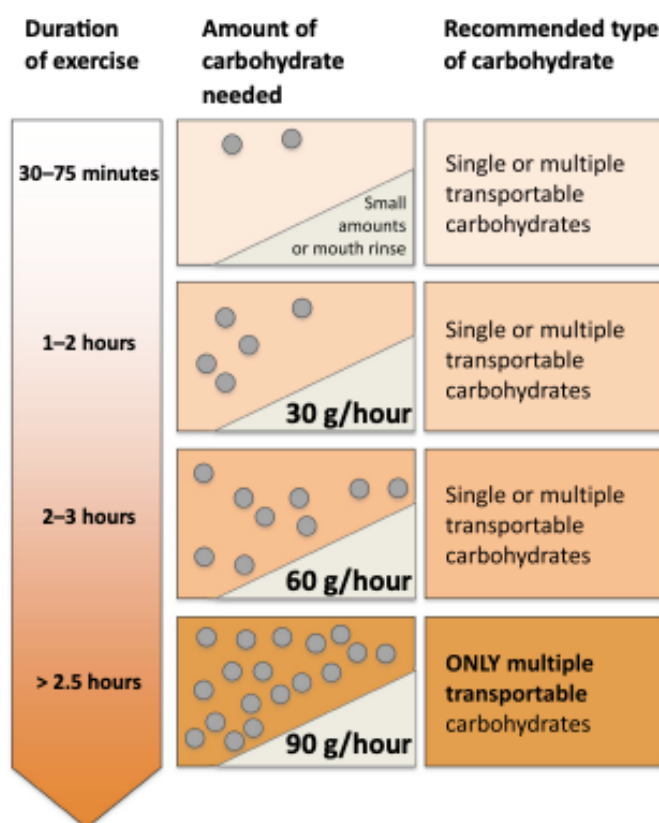


Figure 9: Recommandations d'apports glucidiques lors de l'exercice selon sa durée
Image modifiée d'après (73)

Cette consommation de glucides permet de ralentir l'épuisement des réserves en glycogène et permet de prolonger la durée de l'effort et la performance. Ainsi lors de l'effort, il est conseillé de consommer des glucides simples comme le fructose et le glucose que l'on va retrouver dans les gels, les barres énergétiques ou encore les boissons isotoniques.

Après l'effort, il faudra également une consommation de glucides afin de refaire les stocks de glycogène. Après l'effort, une prise suffisante de glucides est nécessaire pour restaurer le glycogène musculaire et hépatique. Des glucides à index glycémique modéré ou bas sont généralement suffisants lorsque le délai de récupération est d'au moins 24 heures, l'élément déterminant étant surtout la quantité totale de glucides ingérée dans les premières heures de récupération. Des boissons ou collations de récupération associant glucides et protéines peuvent être utilisées pour faciliter l'atteinte de ces apports et optimiser les processus de récupération (78–80).

7.2.2. Protéines : types, rôles dans la récupération et la synthèse musculaire

Les protéines occupent une place centrale dans le métabolisme du sportif : elles constituent les principaux éléments structuraux des muscles et des autres tissus. Lors d'un effort d'endurance, les muscles subissent de nombreux traumatismes et notamment des micro-déchirures qui nécessitent une régénération. Pour ce faire, la consommation de protéines après l'effort est recommandée afin de stimuler la synthèse de protéines musculaires et renforcer et réparer les muscles suite aux lésions subies (81,82).

De plus, bien que ce ne soit pas leur rôle principal, les protéines peuvent contribuer au métabolisme énergétique. En effet, lors d'un apport insuffisant en glucides ou d'un effort prolongé, certains acides aminés issus des protéines musculaires ou alimentaires peuvent être utilisés comme substrats énergétiques, soit après conversion en glucose par néoglucogenèse, soit après transformation en intermédiaires du cycle de Krebs ou en corps cétoniques (83). En effet, lorsque les apports glucidiques deviennent insuffisants et que les réserves de glycogène s'amenuisent, notamment lors d'un jeûne prolongé ou d'un effort d'endurance prolongé, l'organisme sollicite davantage les protéines musculaires. Ces protéines fonctionnelles sont alors dégradées par protéolyse afin de libérer des acides aminés, dont une partie est dirigée vers le foie pour alimenter la néoglucogenèse et contribuer au maintien de la glycémie, tandis qu'une autre partie est directement oxydée ou transformée en intermédiaires métaboliques utilisables pour la production d'ATP. Selon leur devenir, certains acides aminés sont glucogéniques et participent à la formation de glucose, alors que d'autres sont cétogéniques et donnent naissance à de l'acétyl-CoA ou à des corps cétoniques, ensuite utilisables par les muscles pour produire de l'énergie (84–86). Les protéines sont également utilisées comme source d'énergie lors de la phase postprandiale. En effet, les protéines apportées par l'alimentation sont digérées puis absorbées sous forme d'acides aminés au niveau intestinal. Après un repas riche en protéines, les acides aminés glucoformateurs peuvent être convertis en glucose par néoglucogenèse hépatique, tandis que les acides aminés strictement cétoènes et ceux à la fois cétoènes et glucoformateurs fournissent de l'acétyl-CoA ou des corps cétoniques (87,88)

Il est recommandé pour un athlète d'endurance de consommer quotidiennement 1,2 à 1,6 grammes de protéines par kilogramme de poids de corps. En termes de stratégie de consommation, il faut privilégier une distribution des apports tout au long de la journée et

mettre l'accent sur une consommation dans les 30 minutes suivant l'effort afin de maximiser la synthèse protéique post-effort et favoriser la récupération (89).

On distingue plusieurs types de suppléments protéiques (voir le tableau 1 qui résume cette partie) :

- Les protéines de lactosérum, communément appelées « whey », constituent un mélange de protéines dit « complet », car elles apportent les neuf acides aminés essentiels (le tryptophane, la lysine, la méthionine, la phénylalanine, la thréonine, la valine, la leucine, l'isoleucine et l'histidine) en proportions adaptées aux besoins de l'organisme (90–92). Il ne s'agit pas d'un mélange protéique pur (teneur d'environ 70% en protéines) car les protéines de lactosérum peuvent aussi contenir des quantités variables de lactose, de lipides et de sels minéraux. De plus, ce mélange est riche en leucine avec une teneur en leucine d'environ 12% (90,91) qui joue un rôle important dans la synthèse protéique (93,94). Ainsi le meilleur moment pour la consommation de whey est le post-effort et idéalement dans la demi-heure qui suit l'effort (95,96)
- L'isolat de protéines de lactosérum est une forme plus purifiée de whey, obtenue à partir du lactosérum, et sa teneur en protéines est souvent supérieure à 90%. Le reste correspond surtout à de faibles quantités résiduelles de glucides, principalement du lactose, et de lipides, avec une teneur en minéraux qui dépend du procédé de filtration utilisé. Comme la fraction protéique est similaire en termes de composition à celle du lactosérum dont il est issu, l'intérêt principal de l'isolat réside dans sa plus faible teneur en lactose et sa plus grande pureté, ce qui le rend plus adapté aux personnes sensibles au lactose. Après digestion, ses acides aminés sont absorbés rapidement, ce qui en fait une source protéique particulièrement intéressante en post-effort, au même titre que les protéines de lactosérum classiques (95,97).
- L'hydrolysate de protéine de lactosérum est une préparation pré-digérée par un processus d'hydrolyse enzymatique. Ainsi les protéines sont de plus petites tailles et plus faciles à digérer. Il se consomme de la même manière que l'isolat de protéines et que les protéines de lactosérum (95,97).
- La caséine est un ensemble de protéines à absorption lente. Elle est composée de plusieurs fractions protéiques aux propriétés physico-chimiques similaires : les caséines α S1, α S2, β , et κ (98,99). Une fois arrivée dans l'estomac, elle précipite sous l'effet de l'acidité gastrique, formant alors un caillot qui ralentit sa vidange gastrique

mais également la libération des acides aminés qu'elle apporte (98,100). Ce caillot va donc permettre de libérer et donc d'absorber progressivement les acides aminés. Ceci est intéressant puisque cela permet de fournir de petites quantités d'acides aminés sur plusieurs heures. On va donc avoir une augmentation de la synthèse protéique musculaire (98,101). De par ses caractéristiques, ce type de protéine sera donc utilisé pour la récupération musculaire lors des périodes prolongées sans apports protéiques, comme le sommeil (98,102)

- Les protéines végétales sont des alternatives aux protéines de lait. On y retrouve les mélanges de protéines de pois, riz ou encore soja. Bien que certaines protéines végétales présentent des teneurs plus faibles en acides aminés essentiels comparativement aux protéines animales, les données scientifiques disponibles révèlent une situation plus nuancée qu'une simple relation de supériorité (92,99,103). Les différentes sources végétales présentent des profils complémentaires en acides aminés. Les légumineuses (pois, lentilles, soja) sont riches en lysine mais plus pauvres en acides aminés soufrés (méthionine, cystéine), tandis que les céréales (riz, blé, avoine) présentent le profil inverse. Des travaux utilisant la programmation linéaire, une méthode mathématique d'optimisation permettant d'identifier la combinaison de variables la plus pertinente sous un ensemble de contraintes, ont montré que des mélanges optimisés de protéines végétales peuvent approcher, voire reproduire, le profil en acides aminés de certaines protéines animales de référence, telles que le lait, le blanc d'œuf, le poulet, le lactosérum ou la caséine. Dans le domaine de la nutrition, cette approche peut être utilisée pour concevoir des mélanges d'aliments ou de protéines répondant à des critères prédéfinis, par exemple un profil en acides aminés cible (104). Ainsi, les protéines végétales peuvent avoir une efficacité semblable à celle des protéines de lactosérum (103,105). En pratique, cela suggère que, chez un sujet omnivore, l'intérêt peut aussi résider dans la complémentarité entre différentes sources protéiques, y compris l'association de protéines animales et végétales, afin d'optimiser le profil en acides aminés tout en diversifiant les apports. Il n'est cependant pas nécessaire de combiner différentes sources de protéines végétales à chaque consommation pour obtenir un profil complet en acides aminés, à condition de consommer une variété d'aliments au cours de la journée (106). Ces protéines sont à consommer en post-effort.

Tableau 1 : Tableau comparatif des différents types de compléments alimentaires protéiques					
Types de protéines	Vitesse d'absorption	Profil en acides aminé	Moment de consommation	Avantages	Inconvénients
Protéines de lactosérum	Rapide	Complet	Post-effort	Peu coûteuse	Digestibilité parfois mauvaise*
Isolat de protéines de lactosérum	Rapide	Complet	Post-effort	Meilleure digestibilité, pauvre en lactose	Coût élevé
Hydrolysats de protéines de lactosérum	Rapide	Complet	Post-effort	Meilleure digestibilité, absorption très rapide et facilitée	Coût élevé
Caséine	Lente	Complet	Avant le coucher	Libération prolongée	Pas idéale pour une récupération rapide et efficace
Protéines végétales	Moyenne à rapide	Parfois Incomplet	Post-effort	Sans lactose, convient aux végétaliens	Profil d'acide aminé parfois incomplet, nécessite donc plusieurs sources ou un apport suffisamment élevé.

* : La mauvaise tolérance digestive de certaines protéines de lactosérum est surtout liée à la présence résiduelle de lactose, mais elle peut aussi dépendre du degré de purification du produit et de la sensibilité individuelle

La consommation de protéines pures ou en trop grande quantité peut entraîner des effets indésirables ou des risques pour la santé. De nombreuses études se sont intéressées à la question de savoir si la consommation élevée de protéines présente un danger sur la fonction rénale chez le sujet sain. Dans l'ensemble, ces études concluent qu'il n'existe pas de risque significatif d'altération de la fonction rénale chez les sujets en bonne santé consommant des quantités de protéines supérieures aux apports recommandés (107,108,108–110). En revanche, un apport protéique excessif peut accélérer le déclin de la fonction rénale chez les patients atteints d'insuffisance rénale (111,112). Certaines protéines en poudre peuvent être associées à des manifestations digestives telles que des ballonnements, des douleurs abdominales, des flatulences ou des épisodes de diarrhée, en particulier au cours d'un effort prolongé, lorsque la diminution du flux sanguin digestif et le ralentissement de la vidange digestive altèrent la tolérance gastro-intestinale. Cette variabilité de tolérance dépend à la fois de la composition du produit, notamment de la présence résiduelle de lactose dans certaines protéines laitières, et de la structure protéique elle-même(113–116).

7.2.3. Lipides : sources énergétiques secondaires et recommandations

Comme nous l'avons vu précédemment avec le « crossover effect », les lipides sont une source d'énergie essentielle durant les efforts prolongés de faible intensité. Avant leur utilisation, les lipides sont principalement stockés sous forme de triglycérides dans le tissu adipeux. Lorsque l'activité physique commence, les triglycérides subissent la lipolyse, c'est-à-dire qu'ils sont hydrolysés en acides gras libres et en glycérol qui sont transportés par le sang jusqu'aux cellules musculaires. Dans les cellules musculaires, ils vont subir une oxydation afin de produire de l'ATP et donc de l'énergie. L'utilisation des lipides comme source d'énergie est essentielle afin d'épargner les stocks musculaires de glycogène à basse intensité (117,118).

L'oxydation des acides gras prend une part plus ou moins grande dans la fourniture énergétique aux muscles et dépend :

- de l'entraînement : plus un sportif est entraîné plus il utilise les lipides comme source d'énergie (37,117) (voir la figure 3)
- de l'intensité de l'effort : comme nous l'avons vu avec le « crossover effect », l'utilisation des lipides est privilégiée par l'organisme pour un exercice de faible intensité (37,117) (voir la figure 3).

Malgré des dépenses énergétiques importantes chez les sportifs d'endurance, aucune étude ne montre de manière significative qu'une augmentation des apports en lipides permettrait de réduire la fatigue pendant l'effort ou de mieux récupérer. Ainsi, les recommandations d'apport en lipides doivent suivre celle de la population générale ce qui représente un apport de 35 à 40 % de l'énergie totale sous forme de lipides (78,119,120).

7.3. Acides aminés et métabolisme musculaire

7.3.1. BCAA : rôle, efficacité, recommandations

Les acides aminés à chaîne ramifiée, appelés BCAA pour Branched-Chain Amino Acids, sont la leucine, l'isoleucine et la valine. Ce sont des acides aminés essentiels, qui nécessitent donc un apport exogène. Leur apport est indispensable puisqu'ils jouent un rôle dans la synthèse protéique et donc dans le maintien de la masse musculaire. En effet, sur les 9 acides aminés essentiels nécessaires à la synthèse protéique, ce sont les BCAA qui sont limitants (c'est-à-dire que si ces acides aminés comme pour les autres acides aminés essentiels sont présents en quantité insuffisante dans un aliment ou un complément apportant des protéines, cela empêche l'utilisation optimale des autres acides aminés dans la synthèse protéique par l'organisme) (121,122). Ainsi, pendant et après l'effort, les BCAA permettent de réduire la protéolyse et donc la dégradation des protéines musculaires, ce qui retarde l'apparition de la fatigue et améliore la récupération. Cela est d'autant plus vrai dans les sports d'endurance où les réserves énergétiques sont fortement sollicitées (93,121,122).

Après l'effort, la consommation de BCAA permet d'accélérer la récupération en réduisant les douleurs musculaires retardées (DOMS = Delayed onset muscle soreness) et améliore la récupération fonctionnelle. On a une diminution des dégradations des fibres musculaires (121,122). La leucine active mTORC1, une voie clé qui stimule la synthèse des protéines musculaires et participe à la croissance et à la réparation du muscle (123,124). L'isoleucine et la valine permettent de diminuer la quantité de marqueurs de dégradation musculaire produits (créatine kinase et lactate déshydrogénase) ce qui peut parfois diminuer les sensations de courbatures (122,125). La créatine kinase (CK) et la lactate déshydrogénase (LDH) sont des enzymes cytosoliques présentes en concentration élevée dans les cellules musculaires. La CK catalyse la réaction réversible entre la créatine phosphate et l'ATP, jouant un rôle crucial dans le tampon énergétique musculaire. La LDH catalyse la conversion du pyruvate en lactate, permettant la régénération du NAD⁺ nécessaire à la glycolyse aérobie. Lors de dégradations du sarcolemme induites par l'exercice, ces enzymes cytosoliques s'échappent de la cellule musculaire et passent dans la circulation sanguine, où elles peuvent être mesurées comme marqueurs de lésions musculaires. L'élévation des concentrations

sériques de CK et LDH reflète donc l'étendue des dégâts structurels du sarcolemme et de la lyse cellulaire (126,127).

Certaines études animales et humaines ont employé des BCAA selon un ratio leucine/isoleucine/valine de 2:1:1, avec des doses et des périodes d'administration très variables autour de l'exercice. Toutefois, il n'existe pas de consensus sur le schéma optimal de supplémentation chez l'humain (122,128). Dans une autre étude, il est dit que la supplémentation en BCAA ne semble pas avoir d'impact significatif sur les performances (129). On peut retrouver les BCAA sous forme libre purifiée dans des gélules mais également directement incorporés dans les boissons isotoniques, les différentes protéines en poudres ou les boissons pré-effort.

En conclusion, les données disponibles ne démontrent pas d'intérêt clair et constant des BCAA chez le sportif. En pratique, leur intérêt paraît limité lorsque l'apport protéique total est déjà suffisant, ce qui remet en question leur promotion commerciale.

7.3.2. Glutamine : effets physiologiques et controverses

La glutamine est l'un des acides aminés les plus abondants de l'organisme. C'est un acide aminé non essentiel, c'est-à-dire qu'il peut être synthétisé par l'organisme à partir d'autres acides aminés. Il est impliqué dans de nombreux processus physiologiques tels que le métabolisme énergétique (elle peut alimenter le cycle de Krebs en vue de produire de l'ATP) ou encore la synthèse protéique.

La glutamine joue un rôle dans le métabolisme énergétique en participant au fonctionnement du cycle de Krebs. En effet, la glutamine est transformée en glutamate par la glutaminase dans les mitochondries. Le glutamate formé est ensuite transformé en α -cétoglutarate soit par désamination oxydative par la glutamate déshydrogénase, soit par transamination par des transaminases incluant principalement l'aspartate aminotransférase (ASAT) et l'alanine aminotransférase (ALAT). L' α -cétoglutarate entre ensuite dans le cycle de Krebs afin de continuer la production d'énergie (130,131).

La glutamine participe à la synthèse protéique en tant qu'acide aminé constituant des protéines, comme les autres acides aminés, mais elle exerce également des effets régulateurs sur cette synthèse. Parmi les voies impliquées dans cette régulation, la voie mTOR occupe une place centrale. mTOR est une voie de signalisation intracellulaire qui intègre de nombreux

signaux liés à l'état nutritionnel et énergétique de la cellule, notamment la disponibilité en acides aminés, en particulier la leucine, mais aussi en glucose, en ATP et en autres nutriments. Dans ce contexte, la glutamine peut influencer indirectement la synthèse protéique, même si ses effets sur l'activation de mTOR restent variables selon les études (132). Chez des rats diabétiques, la supplémentation en glutamine a stimulé les voies de signalisation favorisant la synthèse protéique (Akt, mTOR, GSK3 et 4E-BP1) et inhibé les voies qui induisent la dégradation protéique (MuRF-1 et MAFbx) (133). D'autre part, certaines recherches montrent des effets antagonistes. Une étude sur cellules musculaires C2C12 a démontré que la glutamine diminue la phosphorylation de mTOR sur Ser2448, de p70S6k et de 4E-BP1, contrairement à la leucine qui les augmente. Cette diminution de l'activation de la voie mTOR suggère alors une moindre stimulation de la synthèse protéique dans ce modèle cellulaire (134).

Concernant l'efficacité de la supplémentation en glutamine chez les athlètes, plusieurs hypothèses ont été avancées suggérant des bénéfices potentiels. Certaines études rapportent des effets positifs sur la récupération musculaire (135,136). Cependant, d'autres études n'ont pas mis en évidence de bénéfice clair de la supplémentation en glutamine sur la synthèse protéique, ce qui limite la portée de l'hypothèse d'un bénéfice de la supplémentation en glutamine. Ces études mettent en avant qu'aucune preuve solide ne prouve qu'une supplémentation en glutamine pourrait augmenter la récupération et la performance des athlètes (135,137). Il n'y a donc pas de recommandation concernant la consommation de glutamine. L'ANSES a publié un avis en 2011 et 2016 dans lequel elle souligne que la supplémentation en compléments alimentaires destinés aux sportifs, incluant ceux contenant de la glutamine, pourrait présenter des risques. Pour la glutamine, l'agence émet une possibilité de faire une hépatite due à la consommation de complément alimentaire contenant de la glutamine. Bien que la glutamine elle-même ne soit pas spécifiquement incriminée dans ces cas, l'ANSES recommande la prudence concernant la consommation de compléments alimentaires pour sportifs en l'absence de supervision médicale. Les données de sécurité à long terme sur la supplémentation en glutamine restent limitées, d'où la nécessité d'études supplémentaires selon l'agence (138,139). De même, au Royaume-Uni, le NHS ne propose à ce jour pas de recommandations spécifiques sur l'usage de la glutamine. Ainsi, les approches françaises et britanniques convergent vers une position de prudence : en l'absence de preuves scientifiques solides démontrant une efficacité nette et des données de

sécurité à long terme suffisantes, la supplémentation en glutamine doit se faire avec prudence.

7.4. Électrolytes et pertes liées à l'effort

Lors d'un effort d'endurance prolongé, la sudation thermorégulatrice entraîne de fortes pertes en eau et en électrolytes. Les principaux électrolytes éliminés sont le sodium (Na^+) et le chlorure (Cl^-). Le potassium (K^+) est également perdu mais en quantité moindre (140,141). La concentration en NaCl de la sueur varie généralement de 20 à 70 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (par exemple 20–62 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ en football, 17–73 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ en marathon, ces chiffres montrent également une grande variabilité individuelle), avec des valeurs individuelles rapportées de 13 à 105 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (142,143). Ainsi, un sportif perd plusieurs grammes de NaCl par heure d'effort (par exemple 40 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ de sueur) (142,144). Ces pertes d'électrolytes augmentent l'osmolalité plasmatique et réduisent le volume sanguin (hypovolémie) (141). En conséquence, la performance physique en souffre. Certains facteurs influencent le débit de sudation :

- l'intensité-: plus l'effort est intense, plus le débit de sudation augmente comme le montre la figure 10 (144).
- l'environnement thermique : chaleur et humidité élevées intensifient la sudation, d'où des pertes accrues en Na^+/Cl^- par temps chaud (144).
- l'acclimatation à la chaleur et l'entraînement augmentent le volume de sueur, mais diminuent souvent sa concentration en sodium, car la réabsorption de Na^+ par le canal de la glande sudoripare est renforcée. Ce phénomène semble lié à une meilleure réponse des glandes sudoripares à l'aldostérone et à une plus grande capacité de réabsorption ionique (142,145).
- les caractéristiques individuelles : sexe, morphologie, facteurs génétiques (comme le gène CFTR) influent sur la composition de la sueur. En effet, Le gène CFTR peut influencer la composition de la sueur car il code une protéine impliquée dans la réabsorption du chlorure dans le canal sudoripare. Lorsque son activité est diminuée, la réabsorption de NaCl est moins efficace et la sueur devient plus riche en sodium et en chlorure (142,146).

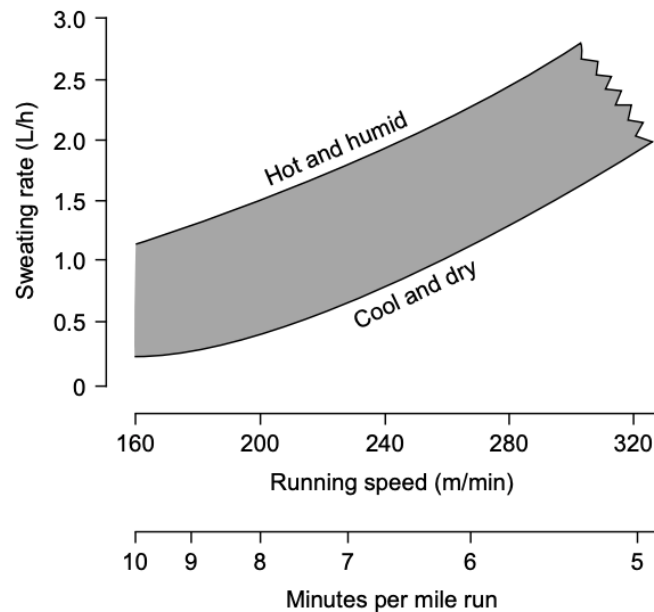


Figure 10 : Influence de l'intensité de l'exercice et des conditions environnementales sur le débit sudoral

Débit sudoral en fonction de la vitesse de course dans des conditions chaudes et humides versus fraîches et sèches. La sudation augmente avec l'intensité de l'effort et est plus élevée en période chaude et humide qu'en conditions fraîches et sèches. Tirée de (142).

Ces pertes peuvent conduire à des désordres hydriques et électrolytiques si elles ne sont pas compensées. En particulier, conduire à une hyponatrémie d'exercice (Na^+ sanguin $< 135 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) qui est un déséquilibre classique chez les sportifs d'endurance (142,147–149). Cette hyponatrémie survient surtout par dilution (surconsommation d'eau pure) mais peut être aggravée par des pertes de Na^+ exceptionnellement élevées (142,147). Environ 13 % des marathoniens présentent une hyponatrémie, soulignant l'importance de compenser la perte sodée (142,148). Des perturbations plus modérées de l'équilibre électrolytique et hydrique (déshydratation modérée, hyperosmolalité) provoquent fatigue et baisse de performance. Certains auteurs suggèrent aussi qu'un déficit en électrolytes contribuerait aux crampes musculaires d'effort, bien que ce lien reste débattu (141,150).

Pour prévenir ces effets, il est donc crucial de restaurer l'eau et les électrolytes perdus. On recommande notamment de remplacer le Na^+ éliminé chez les sportifs d'endurance (effort $> 2 \text{ h}$, effort en conditions chaudes, c'est à dire pertes sodées $> 3\text{--}4 \text{ g}$). Les stratégies de réhydratation s'appuient souvent sur des boissons pour sportifs ou des solutions salées afin de rétablir l'équilibre électrolytique (144,146,150).

7.4.1. Magnésium : rôles, indications et risques

Le magnésium est un minéral impliqué dans de nombreuses réactions enzymatiques de notre organisme. Il est notamment impliqué dans les réactions liées à la production d'ATP, la contraction musculaire ou encore à la transmission nerveuse. Le magnésium intervient comme un régulateur de l'excitabilité neuromusculaire et assure le bon fonctionnement des fibres musculaires. Ainsi, on comprend que le magnésium va jouer un rôle important dans les sports d'endurance et qu'une supplémentation peut être nécessaire. Un déficit en magnésium est souvent évoqué comme cause de l'apparition de crampes mais le mécanisme de leur déclenchement est mal connu et aucune étude n'a pu montrer qu'une supplémentation en magnésium chez les athlètes permettait de réduire la survenue des crampes (151). Cela semble invalider la relation crampe et déficit magnésium seul. Lors d'un effort physique, il y a des pertes sudorales de magnésium. Cela implique des besoins accrus en magnésium chez les sportifs. Lors d'un effort prolongé, les pertes par la sueur concernent plusieurs électrolytes, ce qui justifie une prise en charge globale de l'hydratation et des apports minéraux, et pas uniquement du sodium ou du potassium. Par conséquent, si l'athlète n'a pas un apport correct en magnésium, il risque d'avoir une diminution de la concentration plasmatique en magnésium. Il a été observé une diminution des performances sportives chez les patients carencés et une amplification des conséquences négatives de l'effort comme la fatigue musculaire ou mentale. Ainsi, une supplémentation en magnésium chez les personnes ayant un faible statut en magnésium peut contribuer à la réduction de la fatigue et à l'amélioration de la performance. Cependant, la supplémentation des athlètes qui ont déjà un statut en magnésium adéquat n'a pas montré d'amélioration des performances physiques (152). Au contraire, une étude a montré qu'une supplémentation alimentaire à court terme en magnésium a eu des effets ergolytiques (modestes) avec une diminution de la VO₂max, une diminution de la puissance moyenne développée lors d'un test de sprint et une diminution de la respiration mitochondriale des muscles squelettiques. De plus, l'amélioration des performances lors d'une course contre-la-montre de 10 km était négligeable. Ils ont donc recommandé aux personnes pratiquant régulièrement une activité physique et ne souffrant pas d'hypomagnésémie de privilégier une alimentation de qualité et nutritive et de s'abstenir de compléter leur régime alimentaire avec du magnésium (153). Ainsi, il peut être intéressant de supplémenter les athlètes en magnésium seulement lorsqu'une carence en magnésium est

suspectée. Certains signes peuvent évoquer une carence en magnésium comme par exemple : la fasciculation, la fatigue ou encore la nervosité (154,155). Pour ce faire, on peut conseiller des compléments alimentaires contenant seulement du magnésium ou proposer des boissons de réhydratation ou isotonique contenant du magnésium dans leur formule. En termes d'apports, il est conseillé de ne pas dépasser les recommandations de l'ANSES qui sont de 420 mg par jour au maximum pour les hommes et 360 mg/j au maximum pour les femmes (119). Selon le NHS, un adulte nécessite environ 300 mg de magnésium par jour pour les hommes et 270 mg par jour pour les femmes pour couvrir ses besoins nutritionnels usuels. Le NHS précise que ces apports peuvent généralement être satisfaits par une alimentation variée et équilibrée, et que la supplémentation n'est pas nécessaire chez l'individu sain s'il respecte ces apports alimentaires (156). En termes de limites de sécurité, le NHS met en garde contre la prise de doses très élevées de magnésium provenant de compléments alimentaires. Des apports totaux supérieurs à environ 400 mg par jour sont susceptibles d'entraîner des effets indésirables tels que des troubles gastro-intestinaux (156). Cette approche concorde avec les principes de prudence qui sous-tendent les recommandations françaises, bien que les seuils numériques soulignés au Royaume-Uni tendent à être légèrement inférieurs à ceux fixés par l'ANSES.

7.4.2. Potassium et sodium

Le potassium et le sodium sont des électrolytes impliqués dans l'équilibre hydrique et la propagation de l'influx nerveux. Ils ont par conséquent un rôle crucial dans la prévention de la fatigue et la récupération. Lors d'un effort, si les pertes ne sont pas compensées, on observera une déshydratation progressive de l'athlète et un déséquilibre hydrique entraînant une diminution des performances physiques, une apparition prématurée de la fatigue et une augmentation du risque de malaise (144,146,150). Il est donc essentiel d'avoir une hydratation et une réhydratation efficace (c'est-à-dire pas seulement de l'eau mais plutôt un mélange eau + électrolytes) chez les sportifs d'endurances pour compenser les pertes induites par l'effort.

Il est couramment avancé qu'un déficit en sodium ou en potassium favorise la survenue de crampes musculaires. Cependant, les données scientifiques actuelles montrent que l'impact spécifique de la déficience isolée de ces électrolytes sur la survenue des crampes musculaires est faible, voire non démontré (144,157–159). La littérature récente souligne plutôt une

origine multifactorielle, impliquant de multiples électrolytes et, surtout, une fatigue musculaire locale et une altération du contrôle neuromusculaire (160–162).

Ainsi, un apport en potassium et sodium est primordial avant, pendant et après l'effort afin de maintenir un niveau de performance optimal et donc de retarder au maximum la fatigue et également améliorer la récupération (144,163). Cet apport peut se faire par l'alimentation mais également par des compléments alimentaires comme les pastilles ou les solutions de réhydratation. L'apport nécessaire dépend de l'importance des pertes liées à l'effort. Une étude propose une supplémentation en sodium de 300 à 600 mg/h (soit entre 765 et 1530 mg de NaCl) pour les athlètes d'endurance lors de l'effort (144). En revanche, l'OMS et le NCM (Nordic Council of Ministers qui est l'instance de référence nordique pour la nutrition) ont fixé des limites maximales d'apport à 2400 mg/j de sodium (soit 6,12 g de nacl/j) sur la base du risque d'hypertension artérielle que peut engendrer une surconsommation en sodium. L'OMS a également recommandé d'avoir un apport en potassium suffisant pour obtenir un rapport molaire entre le sodium et le potassium égal à 1 c'est-à-dire une consommation de potassium d'environ 3,4 g/j en se basant sur une consommation de 2 g/j de sodium (119). L'OMS et la NCM ne prennent cependant pas en compte le cas des sportifs d'endurance qui perdent plus de sodium que de potassium et qui doivent donc apporter des concentrations plus importantes de sodium afin d'obtenir un rapport molaire de 1 entre le sodium et le potassium.

7.5. Fer et vitamines du groupe B

7.5.1. Importance du fer et du statut martial chez les sportifs

Le fer est un minéral qui joue un rôle central dans la production des globules rouges et le transport de l'oxygène dans le corps. En effet, c'est le composant clef de l'hémoglobine qui est un pigment respiratoire permettant de transporter l'oxygène des poumons au reste de l'organisme. On comprend donc ici le rôle essentiel du fer pour l'organisme. Une carence en fer est caractérisée la plupart du temps par une asthénie qui diminue la capacité du sportif à exercer ou maintenir une activité physique d'endurance. En effet, une anémie réduit le $VO_2\text{max}$ et donc par extension l'endurance (164,165).

Au-delà de son rôle dans l'hémoglobine et le transport de l'oxygène, le fer intervient également dans des fonctions essentielles à la performance sportive, même en l'absence

d'anémie. Il entre notamment dans la composition de la myoglobine, qui facilite le transport intracellulaire de l'oxygène dans le muscle, ainsi que dans les cytochromes et les enzymes de la chaîne respiratoire mitochondriale, indispensables à la production d'ATP. Une carence martiale peut ainsi altérer le métabolisme énergétique musculaire, diminuer l'endurance et majorer la fatigue, indépendamment de la baisse du taux d'hémoglobine. Le fer participe également au bon fonctionnement du système nerveux central, notamment via des mécanismes impliqués dans la synthèse de neurotransmetteurs tels que la dopamine et la sérotonine, ce qui peut contribuer aux sensations de fatigue et à la baisse de la performance. Enfin, il intervient dans le métabolisme thyroïdien, ce qui peut encore influencer le niveau d'énergie et les capacités d'adaptation à l'effort (166–168).

Il est donc primordial pour les sportifs d'endurance de veiller à avoir un apport en fer en adéquation avec les références nutritionnelles pour la population recommandées par l'ANSES. Ces dernières sont de 11 mg par jour pour les hommes et les femmes ayant des pertes menstruelles faibles ou normales et de 16 mg par jour pour les femmes ayant des pertes menstruelles élevées (119). Le NHS quant à lui préconise un apport journalier en fer d'environ 8,7 mg/jour pour les hommes adultes et de 14,8 mg par jour pour les femmes de 19 à 49 ans, reflétant ainsi une plus forte demande chez les femmes en âge de procréer en raison des pertes menstruelles. Chez les femmes de plus de 50 ans, les besoins sont estimés à 8,7 mg par jour, comme pour les hommes (156). Cette distinction entre les valeurs françaises et britanniques tient en partie à la méthodologie de calcul des apports et aux populations de référence utilisées dans chaque pays. Chez les femmes, l'évaluation d'une carence en fer est primordiale. En effet, plusieurs études montrent que 30 à 60 % des athlètes féminines sont dans des situations de carence vis-à-vis du fer (165,169). Cette évaluation s'effectue par dosage sanguin afin de déterminer le type de carence et l'origine de cette dernière. Ainsi, il est recommandé de supplémenter en fer seulement après un avis médical (119).

7.5.2. Vitamines B1 à B12 : métabolisme énergétique et performances

Les vitamines du groupe B (B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9 et B12) agissent en tant que coenzymes dans de nombreuses voies métaboliques comme le cycle de Krebs par exemple.

La vitamine B1, qui est la thiamine, est une vitamine importante dans le métabolisme glucidique. En effet, elle a un rôle de cofacteur de la pyruvate déshydrogénase. Ce rôle de cofacteur conditionne l'entrée des substrats énergétiques dans le cycle de Krebs. Le stockage de cette vitamine par notre organisme n'étant pas possible, une consommation régulière pour les sportifs d'endurance est recommandée (170,171). Cette vitamine peut être apportée naturellement via l'alimentation par la viande ou les produits céréaliers complets. On la trouve dans de nombreux compléments alimentaires du sportif tels que les boissons isotoniques, les protéines de lactosérum (dans lesquelles elle existe naturellement mais certains fabricants en rajoute parfois) ou encore les barres (170,172).

La vitamine B2, qui est la riboflavine, est impliquée dans les réactions de la chaîne respiratoire mitochondriale. En effet, elle permet la transformation du succinate en fumarate qui intégrera le cycle de Krebs et permettra la production d'ATP. Contrairement à la vitamine B1, la vitamine B2 peut être stockée par l'organisme et ce stockage se fait au niveau du foie, du cœur et des reins (173). Ainsi les carences en vitamine B2 sont rares (170,171). Cette vitamine peut être apportée par l'alimentation et se retrouve majoritairement dans les produits laitiers et les œufs. On la retrouve également dans les mêmes compléments alimentaires que la vitamine B1 (170,172).

La vitamine B3, ou vitamine PP, qui est la niacine, est un cofacteur d'oxydoréduction dans le métabolisme des glucides, des acides aminés et des acides gras. Dans l'organisme, on la retrouvera sous 2 formes : l'acide nicotinique et la nicotinamide. La vitamine B3 est donc impliquée dans le bon déroulement du métabolisme énergétique et influence donc la performance physique lors de l'effort (170,171). On retrouve naturellement cette vitamine dans la viande, le poisson, les produits de la mer et les céréales complètes. On la retrouve dans les boissons isotoniques, les barres ou les boissons de récupération destinées aux sportifs d'endurance (170,172,174).

La vitamine B5, ou acide pantothénique, est indispensable à la synthèse du coenzyme A, dont le groupement 4'-phosphopantéthéine dérive de cette vitamine. Elle intervient ainsi dans de nombreuses voies métaboliques, notamment le catabolisme et l'anabolisme des acides gras,

mais aussi dans le métabolisme de certains glucides et acides aminés. Elle joue également un rôle dans la synthèse de plusieurs enzymes et protéines porteuses d'acyle, impliquées dans le transfert transitoire de groupements acyles au cours des réactions de biosynthèse (175). Elle est donc indispensable à la synthèse et au métabolisme des glucides, acides gras et acides aminés (170,171). On la retrouve naturellement principalement et en plus grande quantité dans la viande, le pain, le lait et les produits laitiers mais elle est ubiquitaire dans l'alimentation. On la retrouve dans les compléments alimentaires dédiés au sportif d'endurance (170,172).

La vitamine B6 regroupe, sous ce terme, six composés vitaminiques : la pyridoxine, le pyridoxal, la pyridoxamine ainsi que leurs formes phosphorylées. Elle agit comme coenzyme dans plus d'une centaine de réactions enzymatiques impliquées dans le métabolisme des macronutriments et dans le fonctionnement neuromusculaire (176). En particulier, la vitamine B6 est impliquée dans la synthèse de l'hème de l'hémoglobine. Ainsi, une carence en vitamine B6 peut conduire à une anémie microcytaire ce qui aurait pour conséquence de réduire l'apport en oxygène au niveau musculaire et donc engendrer une souffrance musculaire (170,171). Les principales sources alimentaires de vitamines B6 sont les céréales, les foies d'animaux et le poisson. Comme pour les autres vitamines du groupe B, on la retrouvera dans les compléments alimentaires du sportif d'endurance (170,172)

La vitamine B8, ou biotine, agit comme coenzyme de cinq carboxylases humaines, dans lesquelles elle est liée de manière covalente en tant que groupement prosthétique. Ces enzymes sont la pyruvate carboxylase, l'acétyl-CoA carboxylase 1 et 2, la propionyl-CoA carboxylase et la méthylcrotonyl-CoA carboxylase. Elles sont respectivement impliquées dans la néoglucogenèse, la synthèse des acides gras, le métabolisme des acides gras et le catabolisme des acides aminés à chaîne ramifiée (177,178). Ainsi, la biotine intervient de manière essentielle dans le métabolisme intermédiaire des substrats énergétiques, en participant à des voies anaboliques et cataboliques indispensables à l'homéostasie énergétique cellulaire (170,171). Cette vitamine n'est pas synthétisée par l'Homme et se retrouve dans les œufs, les champignons ou encore le foie (170,172).

La vitamine B9, qui est appelée l'acide folique ou folate, intervient dans le métabolisme des unités monocarbonées indispensables à la synthèse des purines, des pyrimidines et du thymidylate, contribuant ainsi à la synthèse de l'ADN et de l'ARN. Les cellules de l'organisme au renouvellement rapide sont donc particulièrement sensibles aux variations de quantité de

vitamine B9. Une carence en vitamine B9 affectera donc en priorité les cellules sanguines et les cellules du système immunitaire. Suite à une déficience en folate on observera une anémie mégalo-blastique, c'est-à-dire la production de globules rouges anormaux, grands et peu différenciés, ce qui aurait pour conséquence de réduire l'apport en oxygène au niveau musculaire et donc engendrer une souffrance musculaire (170,171). Les principales sources alimentaires de vitamine B9 sont les légumineuses, les légumes à feuilles et le foie (170,172). La vitamine B12, ou cobalamine, est un cofacteur essentiel de deux enzymes humaines : la méthionine synthase, impliquée dans le cycle des folates et la régénération de la méthionine à partir de l'homocystéine, et la méthylmalonyl-CoA mutase, enzyme mitochondriale intervenant dans le métabolisme du propionate issu notamment du catabolisme des acides gras (171,179). Une carence en vitamine B12 entraîne une accumulation d'homocystéine et d'acide méthylmalonique, perturbant la synthèse de l'ADN et le métabolisme énergétique mitochondrial. L'altération de l'activité de la méthionine synthase empêche la régénération du tétrahydrofolate à partir du 5-méthyltétrahydrofolate, ce qui réduit la disponibilité des folates sous leur forme active pour la synthèse des nucléotides. Il en résulte un trouble de la synthèse de l'ADN, responsable d'une anémie mégalo-blastique caractérisée par la production d'érythrocytes volumineux et immatures (179,180). Cette anémie peut réduire la capacité de transport de l'oxygène et contribuer à une fatigue clinique. La vitamine B12 est synthétisée exclusivement par des micro-organismes (bactéries et archées). Chez l'Homme, elle est principalement apportée par les aliments d'origine animale, ceux-ci accumulant la cobalamine produite par les bactéries présentes dans leur environnement ou leur microbiote digestif. Bien que certaines bactéries environnementales puissent en produire, ces apports sont considérés comme insuffisants et peu biodisponibles pour couvrir les besoins humains (170,171,179). Après ingestion, la vitamine B12 est libérée des protéines alimentaires dans l'estomac sous l'action de l'acidité gastrique et de la pepsine, puis se lie à l'haptocorrine salivaire. Dans le duodénum, les protéases pancréatiques dégradent l'haptocorrine, permettant à la cobalamine de se fixer au facteur intrinsèque sécrété par les cellules pariétales gastriques. Le complexe vitamine B12–facteur intrinsèque est ensuite absorbé au niveau de l'iléon terminal via un mécanisme dépendant de récepteurs spécifiques. Dans la circulation sanguine, la vitamine B12 est transportée principalement liée à la transcobalamine II, formant l'holotranscobalamine, qui constitue la fraction biologiquement active délivrée aux cellules (180). Une attention particulière doit être portée aux athlètes végétaliens, chez lesquels

l'absence de consommation de produits d'origine animale expose à un risque accru de carence. Les athlètes végétariens peuvent également présenter des apports insuffisants selon leurs habitudes alimentaires, ce qui justifie une surveillance nutritionnelle adaptée. De plus, dans la population générale, certains facteurs peuvent altérer l'absorption de la vitamine B12, notamment la prise prolongée d'inhibiteurs de la pompe à protons ou d'autres traitements réduisant l'acidité gastrique, indispensable à la libération de la vitamine B12 alimentaire (170,172).

Il existe peu d'étude sur la supplémentation des athlètes en vitamines appartenant au groupe B. Cependant, les athlètes d'endurance font intervenir leur système énergétique de façon importante et utilisent par conséquent de plus grandes quantités de vitamines du groupe B que la population normale. Il peut donc être recommandé d'avoir une supplémentation pendant et après l'effort tout en veillant à ne pas dépasser les références nutritionnelles pour la population (apport qui couvre en théorie le besoin de 97,5% de la population) fixées par l'ANSES comme le montre le tableau 2.

Tableau 2 : Référence nutritionnelle des vitamines du groupe B pour la population adulte

Vitamine	Homme de plus de 18 ans	Femme de plus de 18 ans	Limite supérieure de sécurité*
B1	0,1 mg/MJ***		
B2	1,6 mg/j		
B3	1,6 mg EN/MJ (équivalent niacine par mégajoule)		Acide nicotinique : 10 mg EN/MJ Nicotinamide : 900 mg EN/MJ
B5	AS** : 6 mg/j	AS : 5 mg/j	
B6	1,7 mg/j	1,6 mg/j	12 mg/j
B8	AS : 40 µg/j		
B9	330 µg EFA/j (équivalents folates alimentaires par jour)		1 mg EFA/j
B12	AS : 4 µg/j		

* Limite supérieure de sécurité : c'est l'apport journalier chronique maximal d'une vitamine ou d'un minéral considéré comme peu susceptible de présenter un risque d'effets indésirables sur la santé de toute la population. ** AS : apport satisfaisant. En l'absence de RNP (références nutritionnelles pour la population, c'est la quantité de nutriments qu'un individu doit consommer chaque jour pour être en bonne santé) on utilisera l'AS qui l'apport pour lequel le statut nutritionnel est jugé satisfaisant. *** 1 MJ (1 mégajoule) = 239 kcal. AS : apport satisfaisant. EFA : équivalents folates alimentaires. EN : équivalent niacine. MJ : mégajoule. RNP : références nutritionnelles pour la population. Tiré de (151).

L'expression des références nutritionnelles en mg/MJ pour certaines vitamines du groupe B reflète leur rôle central dans le métabolisme oxydatif des substrats énergétiques. Lorsque l'activité enzymatique dépendante de ces coenzymes est proportionnelle à l'apport énergétique total, l'expression des besoins par unité d'énergie permet une adaptation aux

variations interindividuelles de consommation calorique. À l'inverse, lorsque les fonctions physiologiques d'une vitamine sont principalement structurelles ou impliquées dans des voies métaboliques non directement proportionnelles à la dépense énergétique, une valeur journalière fixe est retenue. La comparaison entre les recommandations de l'ANSES et celles du NHS montre une cohérence globale pour les vitamines impliquées dans le métabolisme énergétique, les différences observées étant principalement liées au mode d'expression des besoins (mg/MJ versus mg/j). En revanche, pour les vitamines B9 et B12, l'ANSES propose des valeurs supérieures, probablement en raison d'une actualisation méthodologique intégrant des biomarqueurs fonctionnels tels que l'homocystéine plasmatique, l'acide méthylmalonique pour la vitamine B12, ainsi que des critères hématologiques et biologiques comme la macrocytose ou l'anémie mégaloblastique et les données récentes sur le statut nutritionnel (156,170).

7.6. Antioxydants et autres oligoéléments

7.6.1. Vitamines C et E : effets antioxydants et immunitaires

Les vitamines C et E sont deux antioxydants jouant un rôle dans la protection des cellules contre les dégâts oxydatifs dues à la production de radicaux libres. Lors d'un effort physique d'endurance, le métabolisme cellulaire est augmenté et par conséquent la production de radicaux libres aussi. Ces derniers pourront donc causer des lésions oxydatives et entraîner une augmentation de la fatigue durant et après l'effort.

Tout d'abord, la vitamine C ou acide ascorbique est une vitamine impliquée dans de nombreuses réactions comme la synthèse du collagène, la protection antioxydante et le soutien du système immunitaire. En tant qu'antioxydant puissant, la vitamine C neutralise les radicaux libres et protège les cellules musculaires contre le stress oxydatif. Il a été montré qu'une supplémentation suffisante en vitamine C peut limiter les marqueurs de stress oxydatif chez les athlètes, contribuant ainsi à une réduction de la fatigue et à l'augmentation des performances (181).

Au contraire, il a aussi été montré que, dans certaines conditions, une supplémentation trop importante en antioxydants peut atténuer certaines adaptations bénéfiques à l'entraînement plutôt que d'améliorer la performance. Des études indiquent par exemple qu'un apport élevé et prolongé en vitamine C peut réduire les signaux oxydatifs nécessaires à l'activation d'enzymes de défense et de protéines de stress, ce qui peut limiter les adaptations

musculaires induites par l'exercice d'endurance, sans pour autant démontrer clairement un effet directement pro-oxydant ni une augmentation de la fatigue musculaire aiguë chez l'humain sain (182,183).

Les données expérimentales suggèrent que la vitamine C peut devenir pro-oxydante surtout en présence de quantités élevées de métaux de transition réduits, en particulier le fer ferreux, en favorisant des réactions de type Fenton et la production accrue de radicaux hydroxyles, mais ces conditions extrêmes sont difficiles à extrapoler aux situations physiologiques courantes et restent débattues. Il apparaît donc plus prudent de souligner que des doses élevées de vitamine C peuvent perturber l'équilibre redox et les mécanismes d'adaptation à l'exercice, plutôt que d'affirmer qu'elles augmentent systématiquement le stress oxydatif et la fatigue musculaire chez le sportif (183,184).

La vitamine C apporte également un soutien immunitaire aux athlètes qui sont exposés à un risque accru de déclarer une infection après un effort prolongé. En effet, la vitamine C réduit l'incidence des infections des voies respiratoires supérieures chez les individus soumis à un stress physique intense y compris les athlètes d'endurance bien que son effet sur la gravité des symptômes ne soit pas significatif (185).

La vitamine C est également un cofacteur primordial à la synthèse du collagène. Le collagène est une protéine structurale majeure des tissus qui facilite la réparation tissulaire. Ainsi, une synthèse optimale du collagène est cruciale pour maintenir l'intégrité des articulations et des muscles et donc prévenir le risque de blessure (186).

La vitamine C a aussi un impact dans l'absorption du fer non héminique qui est le fer présent dans les aliments d'origine végétale, les œufs et les produits laitiers. Il a été démontré que la co-administration de fer non héminique et de vitamine C améliore significativement les niveaux d'hémoglobine chez les sujets présentant une anémie ferriprive. Ainsi l'usage de vitamine C chez les sportifs d'endurance peut prévenir une carence en fer (187).

Enfin, les principales sources alimentaires de vitamines C sont les fruits et les légumes. On en retrouve également dans la plupart des compléments alimentaires pour sportif d'endurance. En France, il est recommandé de suivre les recommandations de l'ANSES pour la supplémentation en vitamine C qui est de 110 mg/j chez un sujet adulte (170). Le NHS quant à lui recommande une consommation de 40 mg/j de vitamine C pour un sujet adulte (156). Cette divergence sur les recommandations, s'explique par une approche méthodologique distincte : le NHS conserve une valeur historiquement fondée sur la prévention du scorbut,

tandis que l'ANSES base sa recommandation sur l'optimisation du statut plasmatique et la prise en compte des fonctions physiologiques élargies de la vitamine C, notamment son rôle antioxydant et immunitaire.

La vitamine E est principalement connue pour ses effets antioxydants. En effet, cette vitamine prévient la propagation de réactions impliquant des radicaux libres. Dans certaines études, il est également suggéré qu'un déficit en vitamine E pourrait être lié à une augmentation des lésions musculaires et donc une diminution des performances sportives (188). Toutefois, son pouvoir antioxydant dépend d'effets synergiques et complémentaires avec d'autres antioxydants à la fois d'origine endogène et exogène tels que la vitamine C (170).

Il n'a pas été montré qu'un apport supérieur aux recommandations de l'ANSES avait un impact positif sur les performances physiques et la fatigue musculaire. Un excès de vitamine E peut avoir un effet pro-oxydant (189). Ainsi, en France il est recommandé de suivre les recommandations de l'ANSES qui sont de 10 mg/j pour un homme adulte et 9 mg/j pour une femme en termes d'apport suffisant. Que ce soit pour les hommes ou pour les femmes la limite supérieure de sécurité est de 300 mg/j. On retrouve la vitamine E dans les huiles végétales et les fruits oléagineux à coque (170). En grande Bretagne, les recommandations sont de 4 mg/j pour un homme adulte et de 3 mg/j pour une femme adulte (156). Une nouvelle fois, cette divergence s'explique par la différence de raisonnement du NHS et de l'ANSES vis-à-vis de l'apport. L'ANSES cherche un apport optimal alors que le NHS cherche à prévenir le risque de carence seulement.

7.6.2. Polyphénols non-flavonoïdes et flavonoïdes : récupération et inflammation

Les polyphénols et flavonoïdes, présents dans de nombreux fruits, légumes, thé, et vin rouge, sont des composés bioactifs reconnus pour leurs propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires. Ces composés contribuent à la protection des tissus musculaires en neutralisant les radicaux libres produits pendant l'exercice physique intense, réduisant ainsi les dégâts oxydatifs et l'inflammation qui peuvent en résulter.

Les flavonoïdes constituent une famille très diversifiée de molécules, et seule une petite partie d'entre eux a été spécifiquement étudiée dans le contexte de l'inflammation induite par l'exercice, même si leurs effets anti-inflammatoires et antioxydants sont mieux documentés

dans d'autres situations cliniques ou expérimentales. Parmi eux, la quercétine est l'un des composés les plus étudiés, mais les données restent hétérogènes, et il est probable que des effets additifs ou synergiques existent entre différents flavonoïdes et autres nutriments présents dans les aliments riches en polyphénols, ce qui n'est pas forcément reproduit avec un nutriment isolé en gélule. Des travaux expérimentaux montrent que la quercétine peut moduler l'expression de cytokines pro-inflammatoires (telles que IL-6, TNF- α , IL-1 β) via l'inhibition de la voie NF- κ B et améliorer le statut antioxydant, ce qui suggère un rôle potentiel dans l'atténuation de la réponse inflammatoire post-exercice, même si les essais chez le sportif restent limités et parfois non conclusifs. (190–192).

Les polyphénols, tels que ceux trouvés dans les cerises et les raisins, peuvent avoir une efficacité dans la réduction des douleurs musculaires post-effort et l'accélération de la récupération. Une recherche sur des athlètes ayant consommé du jus de cerise acide a montré une diminution des douleurs musculaires après des exercices de haute intensité, associée à la consommation du jus (193). Par ailleurs, une méta-analyse récente indique que des cures à base de polyphénols, incluant des flavonoïdes, peuvent améliorer la récupération de la fonction musculaire et atténuer les douleurs musculaires après un exercice intense, bien que les auteurs soulignent la grande variabilité des études et la nécessité de mieux caractériser les doses, la durée de supplémentation et la composition précise des extraits utilisés (194)

Une revue systématique conclut que la supplémentation en polyphénols (molécules isolées) ou en complexes polyphénoliques (mélange de plusieurs classes de polyphénols) peut améliorer certaines dimensions de la performance d'endurance aérobie et favoriser l'augmentation de l'oxydation des graisses lors de l'exercice, sur la base d'études ayant mesuré la contribution relative des substrats énergétiques par calorimétrie indirecte ou par d'autres marqueurs de l'oxydation lipidique. Les mécanismes proposés incluent l'amélioration de la fonction mitochondriale, le renforcement des défenses antioxydantes et d'éventuelles modulations de la signalisation impliquée dans le métabolisme lipidique, mais les auteurs insistent sur le fait que le nombre d'études reste limité et que les résultats ne sont pas suffisamment robustes pour conclure sur d'autres paramètres (marqueurs cardiovasculaires, statut antioxydant systémique, différences selon le sexe). Il apparaît donc nécessaire de mener des travaux supplémentaires afin de préciser les effets de différents polyphénols, pris isolément ou sous forme de complexes polyphénoliques, sur d'autres dimensions de la santé

et de la performance, ainsi que de mieux définir les modalités optimales d'utilisation (dose, durée et moment de la prise par rapport à l'exercice) (195).

En somme, l'incorporation de polyphénols et flavonoïdes dans l'alimentation ou via des compléments pourrait offrir certains avantages pour les athlètes en réduisant par exemple l'inflammation et les douleurs musculaires après l'exercice, améliorant ainsi la récupération et la performance. Cependant, il est important de noter que l'efficacité de ces compléments peut varier en fonction de la dose, de la durée d'utilisation et des caractéristiques individuelles des athlètes. Il est aussi important de noter qu'il y a peu d'études sur l'usage des polyphénols et les flavonoïdes dans le sport.

7.6.3. Zinc, cuivre, sélénium : protection cellulaire et récupération

Le zinc est un oligoélément essentiel impliqué dans de nombreuses fonctions biologiques. Il est requis pour l'activité de plus de 300 enzymes et intervient dans la structure et la fonction de nombreuses protéines, notamment des facteurs de transcription à doigts de zinc (192,196,197).

Son rôle de cofacteur enzymatique fait du zinc un élément important du métabolisme énergétique, puisqu'il intervient dans des enzymes participant au métabolisme des glucides, lipides et protéines (192,198).

Le zinc n'est pas un antioxydant au sens strict, mais il contribue aux défenses antioxydantes de l'organisme en participant au fonctionnement de plusieurs enzymes, notamment la superoxyde dismutase Cu/Zn, et en stabilisant certaines protéines impliquées dans la réponse au stress oxydatif. Chez le sportif, ces mécanismes peuvent contribuer à limiter le stress oxydatif induit par l'exercice, mais ils ne permettent pas à eux seuls d'expliquer l'ensemble des effets du zinc sur la santé. Le zinc joue aussi un rôle essentiel dans le fonctionnement du système immunitaire, indépendamment du seul contexte de l'exercice, car il intervient dans de nombreuses voies de signalisation et fonctions des cellules immunitaires (192,198,199).

Le zinc intervient dans la synthèse protéique et dans les processus de réparation tissulaire. Chez le sportif, un statut zinc adéquat peut donc contribuer à la récupération après l'exercice, mais les données disponibles ne permettent pas d'affirmer un effet constant de la supplémentation sur la récupération chez les sportifs d'endurance (196,200).

Malgré son rôle important chez le sportif aucune étude n'a montré qu'une supplémentation en zinc aurait des effets bénéfiques sur la performance physique. En revanche, une carence

en zinc chez un sportif d'endurance peut donc engendrer une baisse de l'immunité, une diminution de la récupération physique et par conséquent une fatigue accrue et un risque de blessure plus importante (196,201,202). Un apport excessif en zinc peut être délétère. La toxicité du zinc survient surtout en cas de supplémentation prolongée ou de consommation excessive de produits contenant du zinc, et peut provoquer des nausées, vomissements, douleurs abdominales, diarrhée, ainsi qu'une altération du statut en cuivre pouvant conduire à une anémie et à des troubles neurologiques. Chez le sportif, un excès de zinc n'améliore pas la performance et peut au contraire nuire à l'équilibre micronutritionnel, à l'immunité et à la récupération.

En France, il est donc conseillé de suivre les recommandations de l'ANSES pour la consommation de zinc. Les principales sources alimentaires de zinc sont la viande, le fromage, les abats, les légumineuses, les poissons et les fruits de mer. On en retrouve également dans les compléments alimentaires du sportif d'endurance. Il faut prendre en considération que la biodisponibilité du zinc dépend de nombreux facteurs alimentaires et est nettement diminuée par la consommation simultanée de phytates présents dans les céréales et les légumineuses (voir le tableau 3) (170). Le NHS quant à lui ne module pas la quantité de zinc à apporter au quotidien par rapport à la quantité de phytates ingérés. Il recommande un apport de 9,5 mg/j pour les hommes et de 7,0 mg/j pour les femmes (156).

Tableau 3: Référence nutritionnelle du zinc pour la population en fonction de l'apport alimentaire en phytates

	Niveaux d'apports en phytates (mg/j)	RNP (mg/j)	LSS (mg/j)
Homme de 18 ans et plus	300 (régimes mixtes avec produits animaux, peu de céréales complètes)	9,4	25
	600 (régimes à base de céréales complètes et légumineuses mais incluant encore des produits animaux)	11,7	
	900 (régimes végétariens ou végétaliens très céréaliers avec nombreux produits complets et peu de produits animaux)	14,0	
Femme de 18 ans et plus	300	7,5	25
	600	9,3	
	900	11	

Les phytates étant des facteurs de l'alimentation (notamment dans les céréales complètes) qui diminuent l'absorption du zinc, les recommandations ne sont pas les mêmes en fonction du type d'alimentation du sujet. RNP : référence nutritionnelle pour la population. LSS : limite supérieure de sécurité. Tiré de (170)

Le cuivre est un oligoélément essentiel dont l'homéostasie est finement régulée par l'absorption intestinale, le transport hépatique (céruloplasmine) et l'excrétion biliaire, ce qui limite l'accumulation en cas d'apports élevés mais entraîne un risque de carence en cas

d'apports chroniquement insuffisants. Cependant, des apports chroniquement élevés peuvent conduire à une accumulation hépatique et donc à une toxicité hépatique.

Il agit comme cofacteur de nombreuses métalloenzymes d'oxydo-réduction (céruloplasmine, cytochrome c oxydase, lysyl-oxydase, superoxyde dismutase Cu/Zn, etc.), contribuant ainsi au métabolisme énergétique mitochondrial, à la formation du tissu conjonctif, à la minéralisation osseuse, à la modulation de certains neurotransmetteurs et au métabolisme du fer (170,174,199).

Une carence en cuivre peut se manifester par divers symptômes, notamment une anémie hypochrome, une augmentation du taux de cholestérol, une neutropénie, une leucopénie (170,199). Ainsi, une carence en cuivre peut affecter la performance physique et la capacité de récupération d'un athlète.

Une étude chez des marins soumis à un mois d'entraînement d'endurance intense a mis en évidence une baisse significative du cuivre plasmatique, suggérant une augmentation des besoins ou une redistribution tissulaire, même si les mécanismes restent discutés (203). Les auteurs évoquent notamment l'augmentation de l'utilisation de métalloenzymes dépendantes du cuivre et des pertes accrues via la sueur et l'urine comme hypothèses, mais ces mécanismes doivent être confirmés (199,203). Toutefois, ces résultats doivent être interprétés avec prudence, car ils proviennent d'une population militaire spécifique et ne peuvent pas être extrapolés sans réserve à l'ensemble des sportifs.

Cependant, aucune étude n'avance formellement qu'une supplémentation en cuivre améliore la résistance et la récupération à la fatigue, il est donc préférable de suivre les recommandations de l'ANSES avec un apport satisfaisant de 1,9 mg/j pour les hommes et 1,5 mg/j pour les femmes. Que ce soit pour les hommes ou pour les femmes, la limite supérieure de sécurité est fixée à 5 mg/j en raison d'un risque de rétention hépatique et de toxicité en cas d'apports chroniquement excessifs (170). En revanche, le NHS au Royaume-Uni recommande environ 1,2 mg/j pour les adultes de 19 à 64 ans, une valeur destinée à prévenir les carences dans le cadre d'une alimentation diversifiée (156). Les principales sources de cuivre sont les abats (3,3 mg/100g), les fruits de mer (huîtres : 1,29 mg/100 g) et les fruits à coques (noix de cajou : 2,2 mg/100 g). On en retrouve également dans certains compléments alimentaires destinés au sportif d'endurance.

Le sélénium est un oligo-élément qui joue un rôle dans la protection contre le stress oxydatif et le soutien du système immunitaire.

Tout d'abord, le sélénium est un composant clé de l'enzyme glutathion peroxydase. Cette enzyme aide à neutraliser les radicaux libres et donc à réduire le stress oxydatif. Cette fonction de protection contre le stress oxydatif est essentielle pour prévenir la fatigue chez les sportifs d'endurance. En effet, le sélénium aide à réduire la détérioration cellulaire pendant l'effort et à maintenir l'intégrité des tissus musculaires (204).

Les propriétés antioxydantes du sélénium servent également de soutien pour le système immunitaire. Ce soutien est crucial pour les athlètes d'endurance puisque qu'après un effort long ou des volumes d'entraînements importants leur système immunitaire se retrouve affaibli (204).

Le sélénium se retrouve principalement dans les fruits de mer, certains poissons (thons, sardine, saumon), la viande, les œufs et la noix du Brésil. On en retrouve encore dans les compléments alimentaires du sportif comme les boissons isotoniques ou les barres. Les apports suffisants en sélénium sont de 70 µg/j pour un adulte avec une limite supérieure de sécurité fixée à 255 µg/j (170).

7.7. Caféine

Elle agit en réduisant la perception de l'effort et en retardant donc la fatigue mentale. En effet, la caféine est un stimulant du système nerveux central puisqu'elle augmente la libération de neurotransmetteurs excitateurs comme la noradrénaline, la sérotonine ou la dopamine. Ainsi, l'athlète pourra maintenir une intensité d'effort plus importante sur une durée donnée ou prolonger la durée de son effort (205–208). Plusieurs méta-analyses concluent que la caféine exerce un effet ergogène global, avec une amélioration modeste mais significative des performances d'endurance, de la force musculaire et de l'endurance musculaire (205,209,210).

Les lignes directrices actuelles proposées par des groupes d'experts recommandent, de façon générale, des doses modérées de caféine de l'ordre de 3 à 6 mg/kg de masse corporelle pour obtenir un effet ergogène, sans bénéfice supplémentaire clairement établi au-delà de cette plage. Le moment optimal pour prendre la caféine n'est pas bien défini. Il dépend en partie de la forme de consommation de la caféine (gélule, boisson ...) utilisée et de la durée de l'exercice (205,211).

D'autres études ont mis en évidence des effets positifs sur des plages de doses plus larges allant approximativement de 2 à 9 mg/kg, mais l'augmentation de la dose s'accompagne d'une fréquence plus élevée d'effets indésirables (212,213). En effet, des doses élevées, en particulier supérieures à la partie haute de la plage recommandée (≈ 6 mg/kg), augmentent la probabilité d'effets indésirables tels que tachycardie, nervosité, troubles digestifs et perturbations du sommeil. Des études utilisant des doses très élevées rapportent que la quasi-totalité des participants présente des symptômes comme palpitations, anxiété ou insomnie, sans gain de performance supplémentaire. La survenue de tachycardie et de troubles du sommeil a également été fréquemment rapportée dans des études observationnelles chez de forts consommateurs de caféine, renforçant l'idée qu'il est préférable, chez le sportif, de rester sur des doses modérées adaptées individuellement plutôt que de chercher à augmenter les doses au-delà de 6 mg/kg (213,214).

VIII. Risques de dopage involontaire et conséquences encourues pour les athlètes dopés

Le dopage involontaire constitue un enjeu important en raison du risque de contamination des compléments alimentaires et, plus rarement, de certains aliments. L'AMA (Agence mondiale antidopage) reconnaît notamment le rôle de la contamination alimentaire dans des cas rapportés de viande contenant des substances interdites, comme le clenbutérol. En revanche, les pesticides et les additifs alimentaires usuels ne figurent pas sur la Liste des interdictions de l'AMA et ne sont pas considérés comme des substances dopantes à ce jour (37). Au-delà des risques pour la santé du patient, les conséquences d'un contrôle positif, même non intentionnel, peuvent détruire la carrière d'un athlète et avoir des retentissements néfastes sur sa vie personnelle.

8.1. Mécanismes et prévalence du dopage involontaire

8.1.1. Contamination croisée industrielle

La contamination des compléments alimentaires constitue le principal vecteur de dopage involontaire. En 2022, deux travaux indépendants ont montré l'ampleur du problème : une enquête sur les compléments sportifs a mis en évidence la présence d'au moins une substance figurant sur la Liste des interdictions de l'AMA dans environ 15% des produits testés, dont plus

de la moitié ne mentionnaient pas ces substances sur l'étiquette. (215,216). Une synthèse datant de 2019 recensait une contamination de l'ordre de 12 et 58 % des produits analysés (217). Cette contamination survient principalement lors de la fabrication, dans les usines produisant simultanément des produits autorisés et des substances dopantes. Ainsi, les équipements partagés, les lignes de production communes et les protocoles de nettoyage insuffisants créent des contaminations croisées qui peuvent avoir des conséquences désastreuses pour le sportif (215).

8.1.2. Contamination frauduleuse

Plus préoccupant encore, certains fabricants ajoutent délibérément des substances interdites pour augmenter l'efficacité perçue de leurs produits. On retrouve notamment ces pratiques dans les compléments destinés à la perte de poids ou au gain musculaire. Cela expose les consommateurs à des doses importantes de produits dopants (comme des stimulants, des stéroïdes anabolisants ou des diurétiques) sans que ces derniers soient mentionnés sur l'étiquetage.

8.1.3. Sources à risque majeur

Les études menées au niveau européen ont pu identifier plusieurs catégories et de provenances de produits particulièrement à risque (139) :

- Compléments achetés sur internet (taux de contamination jusqu'à 25%)
- Produits d'origine extra-européenne, notamment asiatique et américaine
- Suppléments destinés à la musculation et à la perte de poids
- Produits vendus dans les salles de sport, sans certification

8.2. Substances principales impliquées dans le dopage et risques associés

8.2.1. Stimulants

L'éphédrine et ses dérivés, la sibutramine et la méthylhexanamine sont fréquemment retrouvés dans les compléments "minceur" ou "énergisants". Ces substances peuvent provoquer des troubles du rythme cardiaque (comme de la tachycardie), de l'hypertension artérielle ou dans les cas les plus extrêmes des accidents vasculaires cérébraux. L'ANSES

rapporte que les manifestations cardiovasculaires constituent les effets indésirables les plus fréquents dans les signalements liés aux compléments alimentaires du sportif (218).

8.2.2. Stéroïdes anabolisants

La présence de stéroïdes anabolisants dans les compléments alimentaires et notamment dans les suppléments protéinés expose à des risques de troubles hormonaux, d'atteintes hépatiques, d'augmentation du risque cardiovasculaire, mais aussi à des troubles psychiatriques. De plus, ces substances perturbent le fonctionnement de l'axe hypothalamo-hypophysaire ce qui, à terme, peut causer des cas d'infertilité, d'atrophie testiculaire et de gynécomastie chez l'homme. Chez la femme, on observe une virilisation avec notamment une augmentation de la pilosité(139).

8.2.3. Diurétiques

Dans le dopage, les diurétiques sont utilisés comme agents masquants, car ils augmentent fortement le volume d'urine et diluent ainsi les concentrations d'autres substances interdites présentes dans les urines, ce qui peut rendre leur détection plus difficile lors des contrôles antidopage. Leur usage expose à un risque de déséquilibre électrolytique, de déshydratation importante et dans les cas les plus graves d'insuffisance rénale aiguë. Ces risques sont majorés lors d'efforts prolongés ou d'intensité élevée, car l'exercice entraîne déjà une perte d'eau et d'électrolytes par la sueur et peut en situation de déshydratation aggraver la souffrance rénale (139,219)

8.3. Principe fondamental du code mondial antidopage

Le code mondial antidopage a établi le principe de responsabilité objective : l'athlète est responsable de toute substance retrouvée dans son organisme, indépendamment de son intention ou de sa connaissance. Cette règle, confirmée par l'article 2.1 du Code, stipule qu'"il n'est pas nécessaire de faire la preuve de l'intention, de la faute, de la négligence ou de l'usage conscient de la part du sportif pour établir une violation des règles antidopage" (218).

8.4. Justification éthique et pratique

Le principe de responsabilité objective repose sur plusieurs fondements. Tout d'abord, il a pour but de protéger l'intégrité sportive en sanctionnant tout avantage déloyal, même en l'absence d'intention. Ce principe met également les athlètes sur un pied d'égalité lors d'un contrôle positif afin de prévenir des excuses frauduleuses et des tentatives de dissimulation. Il a également un rôle de prévention pour le sportif qui doit faire preuve d'une prudence maximale dans le choix des suppléments mais aussi dans les suppléments qu'on peut l'inciter à consommer (218).

8.5. Sanctions disciplinaires graduées

Dans un premier temps, les sanctions varient selon le type de substance et les circonstances (consommation intentionnelle ou non). Le Code mondial antidopage distingue les substances non spécifiées, les substances spécifiées et les « substances d'abus » (220).

- Les substances non spécifiées sont celles qui sont le plus souvent utilisées dans le but d'améliorer la performance (anabolisants, hormone de croissance, certains stimulants ...).
- Les substances spécifiées sont des substances prohibées qui peuvent aussi être utilisées pour des raisons médicales ou présentes dans des produits de consommation courante (par exemple certains diurétiques, bronchodilatateurs, glucocorticoïdes ...).
- Les substances d'abus, car elles sont fréquemment consommées en dehors du contexte sportif (cocaïne, MDMA [une drogue de la classe des amphétamine 3,4-méthylènedioxy-N-méthylamphétamine], héroïne, THC [delta-9- trans tétrahydrocannabinol])

Pour les sanctions, on retrouve ainsi 3 cas de figures (220) :

- Substances non spécifiées : 4 ans de suspension, réduite à 2 ans si l'athlète démontre l'absence d'intention
- Substances spécifiées : 2 ans de suspension, portée à 4 ans en cas d'intention prouvée
- Substances d'abus : 3 mois si usage hors compétition sans rapport avec la performance, réductibles à 1 mois avec programme de réhabilitation

Ensuite, la sanction est modulée en fonction du niveau de pratique du sportif. Le **Code mondial antidopage 2021**, élaboré par l'Agence mondiale antidopage (AMA), distingue plusieurs catégories d'athlètes, ce qui permet d'adapter la sévérité des sanctions. Ainsi, il différencie (221) :

- les **sportifs d'élite** (athlètes internationaux ou nationaux) qui encourent la sanction pleine, appliquée selon les barèmes présentés ci-dessus,
- les **sportifs récréatifs**, définis par les organisations nationales antidopage comme des pratiquants non élite, pour lesquels les sanctions peuvent être réduites et sont en principe plafonnées à deux ans d'inéligibilité pour une première violation,
- les **personnes protégées** (notamment les mineurs ou les athlètes qui, pour des raisons juridiques, n'ont pas pleine capacité), pour lesquelles la durée de sanction dépend surtout des circonstances du dopage (par exemple consommation dans un cadre de pression de l'entourage, méconnaissance des règles ou absence d'accès à une éducation antidopage adéquate) et peut aller d'un simple avertissement jusqu'à deux ans de suspension au maximum.

8.6. Sanctions complémentaires

Au-delà de la suspension sportive, l'athlète sanctionné se verra annuler automatiquement les résultats obtenus le jour du contrôle positif avec une annulation rétroactive possible des résultats postérieurs au prélèvement. Il se verra donc retirer tous les gains (prix, médailles, primes) et récompenses des courses où ses résultats ont été annulés. Il pourra recevoir une sanction pécuniaire (sous forme d'amendes disciplinaires ou de remboursement des frais de procédure engagés par la fédération ou l'organisme antidopage) selon le pays pour lequel il évolue. Enfin, il y aura une publication nominative de la sanction et l'athlète sera catégorisé et stigmatisé comme dopé tout le reste de sa carrière par l'opinion publique (220).

8.7. Conséquences Financières et Contractuelles

8.7.1. Perte immédiate de revenus

La suspension entraîne une cessation immédiate de tous les revenus liés à la performance sportive : primes de résultats, participations aux compétitions, salaires dans les clubs professionnels. Cette perte peut représenter des centaines de milliers d'euros pour les athlètes de haut niveau (222).

8.7.2. Résiliation des contrats de parrainage publicitaire

Les contrats de parrainage publicitaire contiennent systématiquement des clauses de moralité permettant une résiliation immédiate en cas de contrôle positif. Cette résiliation s'accompagne souvent d'une obligation de remboursement des sommes déjà perçues, aggravant la situation financière de l'athlète (222).

8.7.3. Difficultés de reconversion professionnelle

L'étiquette de "dopé" complique considérablement la reconversion professionnelle. Ainsi, les possibilités dans le secteur sportif (entraînement, encadrement, consultation) deviennent quasi inexistantes, forçant le plus souvent une réorientation complète de carrière (222).

8.8. Impact Social et Psychologique

8.8.1. Stigmatisation sociale et isolement

Le dopage génère une stigmatisation sociale majeure, comparable à celle observée dans d'autres domaines de déviance. La plupart du temps, l'athlète dopé devient donc un "paria" du sport et est exclu des cercles qu'il fréquentait. Il est également confronté au quotidien au regard accusateur de ses pairs et du public. On observe également des taux plus élevés de dépression, d'anxiété et d'idéations suicidaires chez les athlètes sanctionnés pour dopage (222).

8.9. Conséquences pénales et civiles

8.9.1. Sanctions pénales en France

Depuis 1989, la consommation de produits dopants n'est plus pénalement répréhensible (223).

Cependant, restent punissables (224) :

- le trafic de substances dopantes : jusqu'à 7 ans d'emprisonnement et 150 000 euros d'amende
- l'administration de produits dopants à un tiers avec des sanctions identiques à celles du trafic
- la détention de substances interdites : 6 mois d'emprisonnement et 7 500 euros d'amende

8.9.2. Responsabilité civile et indemnisations

Les athlètes victimes de dopage involontaire peuvent engager la responsabilité civile des fabricants de compléments pour vice caché ou défaut d'information. Cependant, ces procédures sont longues et incertaines car elles nécessitent de prouver le lien de causalité entre le produit et la contamination.

8.10. Difficultés de recours et défense

8.10.1. Charge de la preuve inversée

L'athlète doit prouver son innocence en cas de dopage involontaire. Il doit démontrer :

- l'origine exacte de la contamination
- l'absence d'intention de se doper
- la prise de précautions raisonnables dans le choix des suppléments

8.10.2.Coûts financiers des procédures

Les procédures d'appel devant le tribunal arbitral du sport coûtent souvent très chères, avec des sommes souvent prohibitives pour un athlète suspendu et donc privé de revenus.

De plus, la brièveté des carrières sportives rend les délais de procédure (18 mois à 3 ans) particulièrement préjudiciables. Ainsi, même en cas d'acquittement final, l'athlète a souvent perdu plusieurs années loin de la scène compétitive et il n'est donc pas sûr d'être au niveau à son retour.

8.11.Prévention et protection

8.11.1.Importance des labels anti-dopage

Les certifications Informed-Sport, AFNOR NF V94-001 et NSF Certified for Sport offrent une protection relative mais non absolue. Ces labels garantissent des analyses régulières afin de détecter les substances interdites dans les compléments alimentaires mais ils ne couvrent pas toutes les substances interdites ni tous les lots de production (139).

8.11.2.Rôle des professionnels de santé

Les pharmaciens, médecins du sport et diététiciens jouent donc un rôle crucial dans la prévention du risque de dopage involontaire en orientant vers des produits certifiés et en sensibilisant aux risques de contamination. Ainsi, leur conseil devient indispensable dans un environnement où l'automédication sportive prolifère. De plus, l'ANSES recommande une sensibilisation renforcée des sportifs aux risques de dopage involontaire, incluant la formation à la lecture des étiquetages et à l'identification des sources fiables (139).

8.12. Perspectives d'évolution

8.12.1. Amélioration des méthodes de détection

Les techniques analytiques actuellement utilisées en lutte antidopage reposent principalement sur la chromatographie couplée à la spectrométrie de masse, permettant non seulement de détecter la présence d'une substance interdite mais également d'en quantifier la concentration avec une grande sensibilité. Il ne s'agit donc pas d'un système binaire (présence ou absence), mais d'une analyse quantitative interprétée au regard de seuils décisionnels établis par l'Agence Mondiale Antidopage. Toutefois, les limites actuelles ne concernent pas la capacité de détection elle-même mais plutôt l'interprétation des concentrations retrouvées. Les progrès technologiques ont conduit à identifier des quantités infimes de substances pouvant résulter d'une contamination accidentelle. À ces concentrations dites ultra-traces, il devient parfois difficile de distinguer une exposition involontaire d'une administration intentionnelle.

Par ailleurs, certaines substances ne disposent pas de seuils clairement définis, ce qui peut complexifier l'évaluation scientifique et juridique des résultats. L'amélioration future des techniques analytiques ne vise donc pas uniquement une sensibilité accrue, mais plutôt une meilleure capacité d'interprétation : développement d'outils permettant de caractériser les profils métaboliques, d'identifier des marqueurs d'administration répétée ou de différencier les voies d'exposition. Les freins à ces évolutions sont à la fois technologiques (complexité des matrices biologiques), scientifiques (variabilité entre laboratoires) et financiers.

8.12.2. Renforcement de la traçabilité

L'amélioration de la traçabilité des compléments alimentaires par la chaîne de blocs (blockchain) pourrait renforcer la transparence du suivi des produits. En effet, la traçabilité classique des compléments alimentaires repose généralement sur des dispositifs centralisés, tels que des bases de données internes, des registres papier ou des logiciels de gestion logistique, dans lesquels chaque acteur de la chaîne renseigne les informations relatives à l'origine, à la transformation, au stockage et à la distribution des produits. Ce mode de suivi permet d'assurer l'identification des lots et de remonter aux différentes étapes du circuit de production, mais il présente certaines limites liées à la possible hétérogénéité des données, à leur mise à jour incomplète ou encore à leur modification a posteriori. À l'inverse, la traçabilité

par chaîne de blocs s'appuie sur un registre numérique partagé entre les différents acteurs, dans lequel les informations sont enregistrées de manière horodatée, sécurisée et difficilement modifiable. Elle ne remplace pas la traçabilité traditionnelle, mais la complète en renforçant la transparence, l'intégrité et la fiabilité des données tout au long de la chaîne d'approvisionnement.

IX. Le rôle du Pharmacien dans l'accompagnement des sportifs d'endurance

Le pharmacien se doit d'avoir une position centrale et multidimensionnelle dans l'écosystème de santé du sportif d'endurance, dépassant largement son rôle traditionnel de dispensateur de médicaments.

9.1. Fondements et légitimité de l'intervention pharmaceutique

9.1.1. Assise Réglementaire et Déontologique

Le rôle du pharmacien auprès des sportifs est rappelé dans un communiqué de l'ordre des pharmaciens qui stipule que "le pharmacien d'officine doit contribuer à l'information et à l'éducation du public en matière sanitaire et sociale. Il contribue notamment à la lutte contre [...] le dopage" (225). Cette obligation déontologique place le pharmacien en première ligne de la prévention des conduites dopantes et de la sécurisation de l'usage des compléments alimentaires.

La Convention de partenariat signée en février 2015 entre le Conseil national de l'Ordre des Pharmaciens et le Ministère des Sports, de la Jeunesse et de la Vie Associative formalise cette mission préventive et établit un cadre d'action concret pour les pharmaciens (225). Cette convention prévoit la mise en œuvre d'actions visant à aider les pharmaciens à jouer pleinement leur mission dans la lutte contre le dopage lié à la consommation de compléments alimentaires.

9.1.2. Accessibilité et Proximité Unique

Les pharmacies d'officine constituent le réseau de professionnels de santé le plus dense et le plus accessible en France avec plus de 22 000 officines métropolitaines et 600 en territoires ultramarins. Ce maillage territorial exceptionnel place les pharmaciens comme l'interlocuteur santé de première intention pour 51% des ventes de compléments alimentaires (225). Cette

position privilégiée lui confère donc une responsabilité particulière dans l'accompagnement sécurisé des sportifs.

De plus, l'accessibilité sans rendez-vous de l'officine fait du pharmacien l'un des rares professionnels de santé consultable immédiatement. Sa facilité d'accès est d'une importance cruciale pour les sportifs souvent contraints par des emplois du temps serrés entre entraînement, travail, vie de famille et compétitions.

9.2. Évaluation pharmaceutique et clinique personnalisée

9.2.1. Évaluation pharmaceutique spécialisée

L'évaluation initiale du sportif par le pharmacien constitue un processus d'évaluation pharmaceutique approfondie adaptée aux spécificités de la pratique sportive. Cette démarche s'articule autour de plusieurs axes d'investigation.

Tout d'abord, le profil du sportif, pharmacien détermine précisément la discipline pratiquée, l'intensité et la fréquence des entraînements, les objectifs de performance. Cette analyse permet d'identifier les besoins nutritionnels spécifiques, les risques de carence liés à chaque type d'effort d'endurance et les facteurs de risque de surentraînement.

Ensuite, l'examen des antécédents médicaux, familiaux et allergologiques prend une dimension particulière chez le sportif. Le pharmacien recherche ici les pathologies cardiovasculaires, rénales, les troubles métaboliques, les antécédents de blessures.

Finalement, le pharmacien évalue l'ensemble des traitements en cours, incluant les médicaments prescrits, l'automédication et les compléments alimentaires déjà consommés. Cette approche permet d'identifier les redondances, les interactions potentielles et les contre-indications s'il y en a (226).

9.2.2. Conciliation médicamenteuse

La conciliation médicamenteuse chez le sportif nécessite une expertise particulière en raison de la complexité des interactions entre l'exercice physique, le métabolisme des substances et les besoins nutritionnels accrus.

Dans le meilleur des cas, le pharmacien réalise une conciliation proactive afin d'établir un bilan médicamenteux optimisé (BMO) avant toute nouvelle supplémentation. Cette démarche

préventive permet d'éviter les interactions médicamenteuses et d'optimiser l'efficacité thérapeutique.

9.2.3. Analyse pharmaceutique des interactions

L'expertise pharmacologique du pharmacien permet d'identifier et prévenir les interactions complexes entre compléments alimentaires, médicaments et exercice physique :

- Interactions pharmacocinétiques : le pharmacien évalue l'impact de l'exercice sur l'absorption, la distribution, le métabolisme et l'élimination des substances. Par exemple, l'hyperventilation lors d'efforts intenses peut modifier l'absorption des médicaments inhalés, tandis que la déshydratation relative peut concentrer les principes actifs (227).
- Interactions pharmacodynamiques : l'analyse porte sur les effets synergiques ou antagonistes entre différentes substances dans le contexte de l'effort physique. Le pharmacien veille particulièrement aux interactions entre stimulants (caféine, éphédrine), diurétiques et électrolytes.
- Modulation de l'efficacité : le pharmacien adapte les conseils de prise en fonction des variations métaboliques induites par l'entraînement. Il peut recommander des ajustements posologiques ou des modifications du moment d'administration pour optimiser l'efficacité.

9.3. Prévention multidimensionnelle des risques

9.3.1. Prévention du dopage involontaire

La prévention du dopage involontaire constitue l'une des missions les plus sensibles du pharmacien dans l'accompagnement des sportifs, avec des enjeux de santé publique et d'intégrité sportive majeurs.

Le pharmacien doit maintenir une veille réglementaire régulière sur la liste des substances interdites de l'Agence mondiale antidopage (AMA), mise à jour annuellement. Il peut également s'appuyer sur des outils professionnels comme le moteur de recherche de l'AFLD (Agence Française de Lutte contre le Dopage) pour vérifier la compatibilité de chaque substance avec la réglementation antidopage (228,229).

Le pharmacien doit s'orienter vers des produits certifiés et ainsi privilégier des compléments bénéficiant de certifications anti-dopage reconnues (Informed-Sport, AFNOR NF V94-001, NSF Certified for Sport). Ces labels contribuent à renforcer le contrôle de la qualité en prévoyant des analyses régulières des lots de production et la détection de certaines substances interdites, mais ils ne constituent pas une garantie absolue d'absence de contamination, leur champ d'application pouvant varier selon les certifications (226).

Le pharmacien sensibilise le sportif au principe de responsabilité objective établi par le Code mondial antidopage : l'athlète demeure responsable de toute substance détectée dans son organisme, indépendamment de son intention ou de sa connaissance. Cette éducation inclut la conservation des preuves d'achat et l'importance du choix des sources d'approvisionnement.

9.3.2. Prévention de la surconsommation et de la iatrogénie

La prévention de la surconsommation constitue un axe majeur de l'intervention pharmaceutique, axe particulièrement crucial face aux données alarmantes de l'ANSES : 154 nouveaux cas d'effets indésirables entre 2016 et 2024, dont 18 très graves incluant deux décès (230)

Le pharmacien identifie les populations particulièrement vulnérables : adolescents, femmes enceintes ou allaitantes, personnes âgées, patients avec pathologies chroniques et les sportifs présentant des pathologies chroniques (139,230).

Le pharmacien veille aux cumuls de dosages lorsque plusieurs compléments contiennent les mêmes principes actifs. Il est particulièrement vigilant concernant les vitamines liposolubles (A, D, E, K), les minéraux (fer, magnésium, zinc) et les stimulants (caféine, taurine) (139,230).

Le pharmacien forme le sportif à la reconnaissance des signes d'alerte : troubles digestifs, manifestations cardiovasculaires, symptômes neurologiques, réactions cutanées. Si un patient arrive à la pharmacie avec des signes d'alertes, le pharmacien estime s'il est nécessaire ou non d'orienter le sportif vers un médecin (139,230).

9.3.3. Pharmacovigilance et nutrivigilance active

Le pharmacien joue un rôle sentinelle dans le système de surveillance sanitaire en participant activement aux dispositifs de pharmacovigilance et de nutrivigilance.

Conformément à ses obligations professionnelles le pharmacien déclare tout effet indésirable suspecté d'être lié à un complément alimentaire au dispositif national de nutrivigilance de l'ANSES (231). Cette déclaration contribue à l'amélioration continue de la sécurité des produits. Le pharmacien doit alors documenter précisément les circonstances de survenue des effets indésirables : produits consommés, dosages, durée de prise, contexte d'utilisation, symptômes observés, évolution clinique. Cette documentation facilite l'analyse causale et l'identification de signaux de sécurité.

9.4. Conseil nutritionnel et optimisation de la performance

9.4.1. Expertise en nutrition sportive

Le pharmacien doit se former pour acquérir une expertise approfondie en nutrition sportive via des diplômes universitaires, lui permettant d'optimiser l'accompagnement des sportifs au quotidien. Cette expertise repose sur une formation continue structurée, une veille régulière de la littérature scientifique et une capacité à confronter des données parfois divergentes pour proposer des recommandations argumentées et adaptées à chaque situation clinique.

Le pharmacien maîtrise alors les principaux mécanismes énergétiques selon le type d'effort, ce qui lui permet de relier concrètement la durée et l'intensité de l'exercice aux substrats utilisés. Dans les sports d'endurance, il doit notamment connaître le fonctionnement du métabolisme aérobie, les modalités d'utilisation du glycogène, la mobilisation des lipides à l'effort prolongé, ainsi que les besoins spécifiques en micronutriments antioxydants et en électrolytes impliqués dans la contraction musculaire et la prévention de la fatigue.

Cette compréhension permet d'adapter précisément les conseils nutritionnels aux exigences physiologiques de chaque discipline (par exemple course à pied ou cyclisme d'endurance) avec gestion des réserves de glycogène. Le pharmacien peut ainsi proposer des schémas d'apport glucidique et protéique différents selon qu'il s'agit d'un entraînement long, d'une séance fractionnée ou d'une phase de récupération rapprochant deux compétitions.

Il intègre également dans ses recommandations la notion de moment optimal de prise des nutriments, afin d'exploiter au mieux la période de sensibilité accrue de l'organisme. Le pharmacien doit aussi préciser la stratégie d'hydratation avant, pendant et après l'effort. L'ensemble de ces connaissances permet au pharmacien d'élaborer, pour le sportif d'endurance, de véritables protocoles personnalisés de supplémentation : choix du type de glucides (maltodextrines, fructose, mélanges glucose/fructose) en fonction de la tolérance digestive et de la durée de l'effort, sélection de sources protéiques de haute valeur biologique en récupération, recommandations sur les compléments en électrolytes, vitamines et antioxydants lorsque l'alimentation courante ne suffit pas. Sa démarche ne se limite pas à la description théorique des nutriments : il discute avec le sportif des bénéfices attendus, des limites des données disponibles, des divergences d'avis dans la littérature et des risques d'un mésusage des compléments, afin de proposer un guide pratique d'utilisation réellement opérationnel.

9.4.2. Personnalisation des protocoles nutritionnels

La personnalisation constitue le cœur de l'expertise pharmaceutique en nutrition sportive, permettant d'adapter les recommandations aux spécificités individuelles de chaque sportif. Le pharmacien détermine les besoins spécifiques en fonction du niveau d'entraînement, de la période de préparation (développement, affûtage, récupération), des objectifs de performance et des contraintes logistiques.

Le pharmacien identifie les intolérances alimentaires, les troubles digestifs liés à l'effort et adapte les formes galéniques et les modalités de prise en conséquence. Il peut recommander des alternatives pour les sportifs intolérants au lactose, sensibles au gluten ou sujets aux troubles gastro-intestinaux à l'effort.

Le pharmacien propose des stratégies nutritionnelles optimisées (voir annexes 2, 3, 4, 5, 6, 7) combinant alimentation naturelle et supplémentation ciblée, en privilégiant le rapport coût-efficacité et en évitant les suppléments redondants ou inutiles.

9.5. Collaboration interprofessionnelle et coordination des soins

9.5.1. Intégration dans l'équipe médicale

Le pharmacien pourrait s'intégrer dans l'équipe pluridisciplinaire entourant le sportif lorsque celle-ci est structurée, notamment dans les clubs, les fédérations ou les centres de performance, en collaboration avec les médecins du sport, les diététiciens, les kinésithérapeutes et les préparateurs physiques.

Le pharmacien pourrait alors maintenir un dialogue permanent avec le médecin du sport pour assurer la cohérence entre les prescriptions médicales et les recommandations nutritionnelles. Il participe aux décisions thérapeutiques complexes et contribue à l'optimisation des protocoles de prise en charge.

La collaboration avec le diététicien permettrait une approche globale de la nutrition du sportif, associant l'expertise alimentaire du diététicien et la compétence pharmacologique du pharmacien. Cette synergie optimiserait l'efficacité de la prise en charge nutritionnelle.

Le pharmacien communiquerait avec les entraîneurs et préparateurs physiques pour adapter la supplémentation aux cycles d'entraînement, aux phases de récupération et aux exigences compétitives.

9.6. Nouvelles missions et évolutions du métier

9.6.1. Entretiens pharmaceutiques spécialisés

L'évolution du métier de pharmacien intègre le développement d'entretiens pharmaceutiques spécialisés, on peut imaginer que ces derniers voient le jour pour les sportifs en s'inspirant des modèles existants pour les pathologies chroniques.

Le pharmacien pourrait proposer des entretiens de prévention structurés pour évaluer les pratiques nutritionnelles du sportif (voir annexe 2), identifier les risques et proposer des plans d'amélioration personnalisés. Ces entretiens s'intègrent dans une démarche de prévention primaire et secondaire. Le conseil délivré par le pharmacien mobilise ainsi des connaissances en physiologie de l'exercice, en nutrition du sportif, en pharmacologie, en métabolisme et en réglementation antidopage, afin d'adapter ses recommandations aux besoins et aux risques propres à chaque athlète (voir les exemples dans l'annexe 2).

Le pharmacien pourrait assurer un suivi dans la durée des sportifs, avec des rendez-vous réguliers pour évaluer l'efficacité des protocoles, adapter les recommandations aux évolutions de la pratique sportive et détecter d'éventuels problèmes.

9.6.2. Promotion de l'activité physique

Le pharmacien devrait avoir un rôle proactif dans la promotion de l'activité physique auprès de la population générale, s'appuyant sur son expertise et sa proximité avec les patients.

Depuis janvier 2024, les pharmaciens peuvent intégrer la promotion de l'exercice physique dans les bilans de prévention aux âges clés de la vie sensibilisant ainsi leurs patients aux bénéfices de l'activité physique.

Le pharmacien peut participer à des programmes de recherche comme l'étude Pharmaps, qui évalue l'efficacité de l'implication des pharmaciens dans la promotion de l'activité physique chez les patients porteurs de pathologies chroniques.

9.7. Formation continue et expertise professionnelle

9.7.1. Coursus de formation spécialisée

Le développement de l'expertise du pharmacien en nutrition sportive devrait s'appuyer sur des programmes de formation continue adaptés aux enjeux contemporains.

Plusieurs facultés de pharmacie proposent des DIU spécialisés :

- « Sport, Santé, conduites dopantes et dopage » à Paris-Saclay,
- « Sport Santé Pharmacie » à Besançon,
- « Nutrition appliquée aux activités physiques et au sport » à Toulouse.

Les formations privées doivent être choisies avec prudence, car elles peuvent comporter des conflits d'intérêts et ne pas offrir la même indépendance scientifique que des formations universitaires ou de sociétés savantes.

L'émergence de certifications professionnelles (comme la certification "Accompagner la nutrition du sportif" enregistrée au répertoire spécifique (232) sous le n° RS7081) valorise l'expertise du pharmacien et rassure les sportifs sur la qualité de l'accompagnement (233).

9.7.2. Veille scientifique et réglementaire

Il serait souhaitable que le pharmacien s'appuie sur une veille scientifique et réglementaire régulière afin d'actualiser ses connaissances et d'adapter ses conseils aux évolutions qui concernent son exercice professionnel. À ce titre, il pourrait suivre les publications de référence en nutrition sportive, en pharmacologie de l'exercice et en médecine du sport, ainsi que rester attentif aux modifications de la liste des substances interdites, aux évolutions de la réglementation des compléments alimentaires et aux nouvelles recommandations des organismes de référence, tels que l'ANSES, l'EFSA, l'AMA et les sociétés savantes

9.7.3. Optimisation du rapport coût-efficacité

Le pharmacien devrait aider le sportif à évaluer le rapport coût-bénéfice des différentes options de supplémentation, en tenant compte des objectifs de performance, du budget disponible et des contraintes pratiques présentées par le sportif.

En prévenant les effets indésirables liés à la surconsommation de compléments et en évitant les interactions, le pharmacien devrait contribuer à la réduction des coûts de santé liés à la iatrogénie médicamenteuse.

X. Conclusion

Les sports d'endurance soumettent l'organisme à des sollicitations intenses et prolongées qui perturbent l'équilibre physiologique global. Entre pertes hydriques, épuisement des réserves énergétiques et surproduction de radicaux libres, l'athlète doit faire face à des contraintes qui peuvent altérer sa performance et sa récupération. C'est dans ce contexte que l'intérêt pour les compléments alimentaires a progressivement pris de l'ampleur avec l'espoir d'atténuer la fatigue, d'améliorer la récupération et de soutenir les capacités physiques. Ce travail a permis d'examiner les principaux compléments utilisés dans le cadre des sports d'endurance. Il apparaît clairement que certains nutriments comme les glucides ou les protéines sont incontournables pour soutenir l'effort et accélérer la régénération musculaire à condition d'être consommés de manière adaptée tant en termes de quantité que de moment de prise. D'autres substances, comme les BCAA ou la glutamine, ont montré des effets intéressants, bien que les données scientifiques restent contradictoires ou insuffisantes. Le pharmacien est donc là pour informer le patient que les données à l'heure actuelle sont limitées. Par ailleurs, ce travail met en lumière le rôle non négligeable des micronutriments et des antioxydants. Électrolytes, fer, vitamines du groupe B, mais aussi polyphénols ou vitamines C et E contribuent à maintenir l'équilibre métabolique de l'athlète, à condition toutefois que leur apport réponde à un besoin réel. L'excès ou l'usage inapproprié de ces compléments peut s'avérer contre-productif voire délétère pour l'athlète. Au-delà de l'aspect physiologique, la dimension réglementaire et éthique de la supplémentation ne peut être ignorée. Le pharmacien, en tant que professionnel de santé de proximité joue un rôle crucial dans le conseil, la prévention et l'accompagnement du sportif. Il veille à la qualité des produits, à la conformité réglementaire et au respect des règles anti-dopage garantissant ainsi une pratique sécurisée et responsable. En somme, bien que les compléments alimentaires puissent représenter un soutien utile pour répondre aux exigences des sports d'endurance, ils ne remplacent ni une alimentation équilibrée ni une stratégie d'entraînement bien construite. Leur usage doit être réfléchi, personnalisé et encadré. La recherche scientifique est toujours en train d'explorer ces approches nutritionnelles qui ne sont pas une science exacte, pour affiner les pratiques et mieux comprendre leurs effets à long terme sur la santé et la performance.

XI. Références bibliographiques

1. Journal officiel n° L 183 du 12/07/2002 p. 0051 - 0057; [text/html; charset=UNICODE-1-1-UTF-8] [Internet]. OPOCE; [cité 2 mars 2026]. EUR-Lex - 32002L0046 - FR. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2002/46/oj/eng>
2. AVIS de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à l'identification des populations concernées par l'alimentation particulière et démarche d'évaluation. Publié le 11 juin 2008 [Internet]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2006sa0237.pdf>
3. cjulien. Références nutritionnelles pour les adultes - Populations. Cerin [Internet]. 2 nov 2021 [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.cerin.org/articles/references-nutritionnelles-pour-les-adultes/>
4. Vitale K, Getzin A. Nutrition and Supplement Update for the Endurance Athlete: Review and Recommendations. *Nutrients*. 7 juin 2019;11(6):1289. doi:10.3390/nu11061289 PubMed PMID: 31181616; PubMed Central PMCID: PMC6628334.
5. Moss K, Kreutzer A, Graybeal AJ, Zhang Y, Braun-Trocchio R, Porter RR, et al. Nutrient Adequacy in Endurance Athletes. *Int J Environ Res Public Health*. 11 avr 2023;20(8):5469. doi:10.3390/ijerph20085469 PubMed PMID: 37107749; PubMed Central PMCID: PMC10138386.
6. Bhardwaj RL, Parashar A, Parewa HP, Vyas L. An Alarming Decline in the Nutritional Quality of Foods: The Biggest Challenge for Future Generations' Health. *Foods*. 14 mars 2024;13(6):877. doi:10.3390/foods13060877 PubMed PMID: 38540869; PubMed Central PMCID: PMC10969708.
7. Richards JD, Cori H, Rahn M, Finn K, Bárcena J, Kanellopoulos AK, et al. Micronutrient bioavailability: concepts, influencing factors, and strategies for improvement. *Front Nutr*. 2025;12:1646750. doi:10.3389/fnut.2025.1646750 PubMed PMID: 41346669; PubMed Central PMCID: PMC12673670.
8. Article L5111-1 - Code de la santé publique - Légifrance [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000045404922
9. DIRECTIVE 2001/83/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 6 novembre 2001 instituant un code communautaire relatif aux médicaments à usage humain [Internet]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2001:311:0067:0128:fr:PDF>
10. Arrêté du 9 mai 2006 relatif aux nutriments pouvant être employés dans la fabrication des compléments alimentaires - Légifrance [Internet]. [cité 26 avr 2026]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000637294?init=true&page=1&query=compl%C3%A9ments+alimentaires&searchField=ALL&tab_selection=all
11. Arrêté du 24 juin 2014 établissant la liste des plantes, autres que les champignons, autorisées dans les compléments alimentaires et les conditions de leur emploi - Légifrance [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGITEXT000029255041/2024-11-26>
12. RÈGLEMENT (UE) No 1169/2011 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 25 octobre 2011. [Internet]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:02011R1169-20180101>
13. RÈGLEMENT (CE) No 1924/2006 DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL du 20 décembre 2006 concernant les allégations nutritionnelles et de santé portant sur les denrées alimentaires [Internet]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:012:0003:0018:FR:PDF>
14. Définition - Sportifs de haut niveau | Insee [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1781>

15. Sport, santé, activité physique, sédentarité : de quoi parle-t-on ? Professeur Martine DUCLOS Conseillère scientifique auprès du ministère en charge des sports [Internet]. Disponible sur: <https://www.sports.gouv.fr/media/2107/download>
16. Deux tiers des 15 ans ou plus ont une activité physique ou sportive régulière en 2020 | Insee [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/6535289#onglet-2>
17. Plotkin DL, Roberts MD, Haun CT, Schoenfeld BJ. Muscle Fiber Type Transitions with Exercise Training: Shifting Perspectives. *Sports*. 10 sept 2021;9(9):127. doi:10.3390/sports9090127
18. Bourdeau Julien I, Sephton CF, Dutchak PA. Metabolic Networks Influencing Skeletal Muscle Fiber Composition. *Front Cell Dev Biol*. 28 sept 2018;6:125. doi:10.3389/fcell.2018.00125
19. Poole DC, Jones AM. Measurement of the maximum oxygen uptake $\dot{V}O_{2max}$: $\dot{V}O_{2peak}$ is no longer acceptable. *J Appl Physiol*. 1 avr 2017;122(4):997-1002. doi:10.1152/jappphysiol.01063.2016 PubMed PMID: 28153947.
20. Grant S, Corbett K, Amjad AM, Wilson J, Aitchison T. A comparison of methods of predicting maximum oxygen uptake. *Br J Sports Med*. sept 1995;29(3):147-52. doi:10.1136/bjsm.29.3.147 PubMed PMID: 8800845; PubMed Central PMCID: PMC1332303.
21. Dugas MO, Paradis-Deschênes P, Simard L, Chevrette T, Blackburn P, Lavallière M. Comparison of VO_{2max} Estimations for Maximal and Submaximal Exercise Tests in Apparently Healthy Adults. *Sports*. 27 nov 2023;11(12):235. doi:10.3390/sports11120235 PubMed PMID: 38133102; PubMed Central PMCID: PMC10747607.
22. Nystoriak MA, Bhatnagar A. Cardiovascular Effects and Benefits of Exercise. *Front Cardiovasc Med*. 28 sept 2018;5:135. doi:10.3389/fcvm.2018.00135
23. MSD Manual Professional Edition [Internet]. [cité 20 avr 2026]. Athlete's Heart - Cardiology. Disponible sur: <https://www.msmanuals.com/professional/cardiovascular-disorders/sports-and-the-heart/athlete-s-heart>
24. Bokre SR, Rahate DJ, Khare AS, Meher A. Pulmonary Adaptations to Sprint and Endurance Training: A Cross-sectional Comparative Study. *J Heart Valve Dis*. 18 juill 2025;30:142-6.
25. Hackett DA. Lung Function and Respiratory Muscle Adaptations of Endurance- and Strength-Trained Males. *Sports*. 10 déc 2020;8(12):160. doi:10.3390/sports8120160 PubMed PMID: 33321800; PubMed Central PMCID: PMC7764033.
26. Brooks GA, Mercier J. Balance of carbohydrate and lipid utilization during exercise: the « crossover » concept. *J Appl Physiol*. juin 1994;76(6):2253-61. doi:10.1152/jappl.1994.76.6.2253
27. Van der Vusse GJ, Glatz JFC, Van Nieuwenhoven FA, Reneman RS, Bassingthwaite JB. Transport of Long-Chain Fatty Acids Across the Muscular Endothelium. *Adv Exp Med Biol*. 1998;441:181-91. doi:10.1007/978-1-4899-1928-1_17 PubMed PMID: 9781325; PubMed Central PMCID: PMC4121332.
28. Guo Z, Burguera B, Jensen MD. Kinetics of intramuscular triglyceride fatty acids in exercising humans. *J Appl Physiol*. nov 2000;89(5):2057-64. doi:10.1152/jappl.2000.89.5.2057 PubMed PMID: 11053362.
29. Horowitz JF, Klein S. Lipid metabolism during endurance exercise. *Am J Clin Nutr*. août 2000;72(2 Suppl):558S-63S. doi:10.1093/ajcn/72.2.558S PubMed PMID: 10919960.
30. Liu C, Wu J, Zhu J, Kuei C, Yu J, Shelton J, et al. Lactate Inhibits Lipolysis in Fat Cells through Activation of an Orphan G-protein-coupled Receptor, GPR81. *J Biol Chem*. janv 2009;284(5):2811-22. doi:10.1074/jbc.M806409200

31. de Glisezinski I, Larrouy D, Bajzova M, Koppo K, Polak J, Berlan M, et al. Adrenaline but not noradrenaline is a determinant of exercise-induced lipid mobilization in human subcutaneous adipose tissue. *J Physiol.* 1 juill 2009;587(Pt 13):3393-404. doi:10.1113/jphysiol.2009.168906 PubMed PMID: 19417097; PubMed Central PMCID: PMC2727046.
32. Stich V, de Glisezinski I, Crampes F, Suljkovicova H, Galitzky J, Riviere D, et al. Activation of antilipolytic $\alpha(2)$ -adrenergic receptors by epinephrine during exercise in human adipose tissue. *Am J Physiol.* oct 1999;277(4):R1076-1083. doi:10.1152/ajpregu.1999.277.4.R1076 PubMed PMID: 10516247.
33. Stich V, de Glisezinski I, Crampes F, Suljkovicova H, Galitzky J, Riviere D, et al. Activation of antilipolytic $\alpha 2$ -adrenergic receptors by epinephrine during exercise in human adipose tissue. *Am J Physiol-Regul Integr Comp Physiol.* oct 1999;277(4):R1076-83. doi:10.1152/ajpregu.1999.277.4.R1076
34. Stich V, de Glisezinski I, Galitzky J, Hejnova J, Crampes F, Rivière D, et al. Endurance training increases the beta-adrenergic lipolytic response in subcutaneous adipose tissue in obese subjects. *Int J Obes Relat Metab Disord J Int Assoc Study Obes.* avr 1999;23(4):374-81. doi:10.1038/sj.ijo.0800829 PubMed PMID: 10340815.
35. Park SY, Jung SR, Kim JY, Kim YW, Sung HK, Park SY, et al. Lactate promotes fatty acid oxidation by the tricarboxylic acid cycle and mitochondrial respiration in muscles of obese mice. *Am J Physiol Cell Physiol.* 1 sept 2024;327(3):C619-33. doi:10.1152/ajpcell.00060.2024 PubMed PMID: 38981606.
36. Maunder E, Plews DJ, Kilding AE. Contextualising Maximal Fat Oxidation During Exercise: Determinants and Normative Values. *Front Physiol.* 2018;9:599. doi:10.3389/fphys.2018.00599 PubMed PMID: 29875697; PubMed Central PMCID: PMC5974542.
37. Purdom T, Kravitz L, Dokladny K, Mermier C. Understanding the factors that effect maximal fat oxidation. *J Int Soc Sports Nutr.* 5 janv 2018;15(1):3. doi:10.1186/s12970-018-0207-1
38. Vigh-Larsen JF, Ørtenblad N, Emil Andersen O, Thorsteinsson H, Kristiansen TH, Bilde S, et al. Fibre type- and localisation-specific muscle glycogen utilisation during repeated high-intensity intermittent exercise. *J Physiol.* 1 nov 2022;600(21):4713-30. doi:10.1113/JP283225 PubMed PMID: 36030498; PubMed Central PMCID: PMC9825866.
39. Shaw CS, Swinton C, Morales-Scholz MG, McRae N, Erftemeyer T, Aldous A, et al. Impact of exercise training status on the fiber type-specific abundance of proteins regulating intramuscular lipid metabolism. *J Appl Physiol.* 1 févr 2020;128(2):379-89. doi:10.1152/jappphysiol.00797.2019 PubMed PMID: 31917629.
40. San-Millán I, Brooks GA. Assessment of Metabolic Flexibility by Means of Measuring Blood Lactate, Fat, and Carbohydrate Oxidation Responses to Exercise in Professional Endurance Athletes and Less-Fit Individuals. *Sports Med.* 1 févr 2018;48(2):467-79. doi:10.1007/s40279-017-0751-x
41. Mølmen KS, Almquist NW, Skattebo Ø. Effects of Exercise Training on Mitochondrial and Capillary Growth in Human Skeletal Muscle: A Systematic Review and Meta-Regression. *Sports Med.* janv 2025;55(1):115-44. doi:10.1007/s40279-024-02120-2 PubMed PMID: 39390310; PubMed Central PMCID: PMC11787188.
42. Koma R, Shibaguchi T, Yamada T, Nonaka Y, Jue T, Yamazaki A, et al. Endurance training increases mitochondrial myoglobin and enhances its interaction with complex IV in rat plantaris muscle. *Acta Physiol.* mai 2024;240(5):e14139. doi:10.1111/apha.14139 PubMed PMID: 38509816.
43. Yoshida Y, Jain SS, McFarlan JT, Snook LA, Chabowski A, Bonen A. Exercise- and training-induced upregulation of skeletal muscle fatty acid oxidation are not solely dependent on mitochondrial machinery and biogenesis. *J Physiol.* 15 sept 2013;591(18):4415-26. doi:10.1113/jphysiol.2012.238451 PubMed PMID: 22890711; PubMed Central PMCID: PMC3784190.

44. Gandevia SC. Spinal and Supraspinal Factors in Human Muscle Fatigue. *Physiol Rev.* 10 janv 2001;81(4):1725-89. doi:10.1152/physrev.2001.81.4.1725
45. Wan J jing, Qin Z, Wang P yuan, Sun Y, Liu X. Muscle fatigue: general understanding and treatment. *Exp Mol Med.* oct 2017;49(10):e384-e384. doi:10.1038/emm.2017.194
46. Davis JM, Bailey SP. Possible mechanisms of central nervous system fatigue during exercise: *Med Amp Sci Sports Amp Exerc.* janv 1997;29(1):45-57. doi:10.1097/00005768-199701000-00008
47. Meeusen R, Watson P, Hasegawa H, Roelands B, Piacentini MF. Central fatigue: the serotonin hypothesis and beyond. *Sports Med.* 2006;36(10):881-909. doi:10.2165/00007256-200636100-00006 PubMed PMID: 17004850.
48. Davis JM. Carbohydrates, branched-chain amino acids, and endurance: the central fatigue hypothesis. *Int J Sport Nutr.* juin 1995;5 Suppl:S29-38. doi:10.1123/ijsn.5.s1.s29 PubMed PMID: 7550256.
49. Newsholme EA, Blomstrand E. Branched-chain amino acids and central fatigue. *J Nutr.* janv 2006;136(1 Suppl):274S-6S. doi:10.1093/jn/136.1.274S PubMed PMID: 16365097.
50. Meeusen R, Van Cutsem J, Roelands B. Endurance exercise-induced and mental fatigue and the brain. *Exp Physiol.* déc 2021;106(12):2294-8. doi:10.1113/EP088186
51. Spriet LL. Phosphofructokinase activity and acidosis during short-term tetanic contractions. *Can J Physiol Pharmacol.* 1 févr 1991;69(2):298-304. doi:10.1139/y91-046
52. Woodward M, Debold EP. Acidosis and Phosphate Directly Reduce Myosin's Force-Generating Capacity Through Distinct Molecular Mechanisms. *Front Physiol.* 10 juill 2018;9. doi:10.3389/fphys.2018.00862
53. Allen DG, Westerblad H. Role of phosphate and calcium stores in muscle fatigue. *J Physiol.* 1 nov 2001;536(Pt 3):657-65. doi:10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00657.x PubMed PMID: 11691862; PubMed Central PMCID: PMC2278904.
54. Allen DG, Westerblad H. Role of phosphate and calcium stores in muscle fatigue. *J Physiol.* 1 nov 2001;536(Pt 3):657-65. doi:10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00657.x PubMed PMID: 11691862; PubMed Central PMCID: PMC2278904.
55. Role of the phosphocreatine system on energetic homeostasis in skeletal and cardiac muscles - PMC [Internet]. [cité 20 avr 2026]. Disponible sur: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4898252/>
56. Sahlin K. Muscle Energetics During Explosive Activities and Potential Effects of Nutrition and Training. *Sports Med Auckl Nz.* 2014;44(Suppl 2):167-73. doi:10.1007/s40279-014-0256-9 PubMed PMID: 25355190; PubMed Central PMCID: PMC4213384.
57. Baker JS, McCormick MC, Robergs RA. Interaction among Skeletal Muscle Metabolic Energy Systems during Intense Exercise. *J Nutr Metab.* 2010;2010:905612. doi:10.1155/2010/905612 PubMed PMID: 21188163; PubMed Central PMCID: PMC3005844.
58. Powers SK, Jackson MJ. Exercise-Induced Oxidative Stress: Cellular Mechanisms and Impact on Muscle Force Production. *Physiol Rev.* oct 2008;88(4):1243-76. doi:10.1152/physrev.00031.2007
59. Alghannam AF, Ghaith MM, Alhussain MH. Regulation of Energy Substrate Metabolism in Endurance Exercise. *Int J Environ Res Public Health.* 7 mai 2021;18(9):4963. doi:10.3390/ijerph18094963
60. Hargreaves M, Spriet LL. Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nat Metab.* 3 août 2020;2(9):817-28. doi:10.1038/s42255-020-0251-4

61. Atkinson FS, Foster-Powell K, Brand-Miller JC. International Tables of Glycemic Index and Glycemic Load Values: 2008. *Diabetes Care*. 1 déc 2008;31(12):2281-3. doi:10.2337/dc08-1239
62. Thomas D, Brotherhood J, Brand J. Carbohydrate Feeding before Exercise: Effect of Glycemic Index. *Int J Sports Med*. avr 1991;12(02):180-6. doi:10.1055/s-2007-1024664
63. Akoara [Internet]. 2022 [cité 3 mars 2026]. Qu'est-ce que l'indice glycémique et la charge glycémique ? Disponible sur: <https://akoara.com/indice-glycemique/>
64. Holesh JE, Aslam S, Martin A. Physiology, Carbohydrates. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459280/> PubMed PMID: 29083823.
65. Monosaccharid Diagramm Lesson Explainer: Carbohydrates | Nagwa [Internet]. [cité 3 mars 2026]. Disponible sur: <https://fity.club/lists/suggestions/monosaccharid-diagramm/>
66. Murray B, Rosenbloom C. Fundamentals of glycogen metabolism for coaches and athletes. *Nutr Rev*. 1 avr 2018;76(4):243-59. doi:10.1093/nutrit/nuy001
67. Ramonas A, Laursen PB, Williden M, Kilding AE. The effect of acute manipulation of carbohydrate availability on high intensity running performance, running economy, critical speed, and substrate metabolism in trained Male runners. *Eur J Sport Sci*. sept 2023;23(9):1961-71. doi:10.1080/17461391.2022.2130097
68. Hawley JA, Schabort EJ, Noakes TD, Dennis SC. Carbohydrate-Loading and Exercise Performance: An Update. *Sports Med*. août 1997;24(2):73-81. doi:10.2165/00007256-199724020-00001
69. Hearris M, Hammond K, Fell J, Morton J. Regulation of Muscle Glycogen Metabolism during Exercise: Implications for Endurance Performance and Training Adaptations. *Nutrients*. 2 mars 2018;10(3):298. doi:10.3390/nu10030298
70. Solem K, Clauss M, Jensen J. Glycogen supercompensation in skeletal muscle after cycling or running followed by a high carbohydrate intake the following days: a systematic review and meta-analysis. *Front Physiol*. 18 août 2025;16:1620943. doi:10.3389/fphys.2025.1620943
71. Giuntini EB, Sardá FAH, De Menezes EW. The Effects of Soluble Dietary Fibers on Glycemic Response: An Overview and Futures Perspectives. *Foods*. 6 déc 2022;11(23):3934. doi:10.3390/foods11233934
72. Jenkins DJ, Willett WC. Perspective on the health value of carbohydrate-rich foods: glycemic index and load; fiber and whole grains. *Am J Clin Nutr*. sept 2024;120(3):468-70. doi:10.1016/j.ajcnut.2024.07.004
73. Jeukendrup A. A Step Towards Personalized Sports Nutrition: Carbohydrate Intake During Exercise. *Sports Med*. mai 2014;44(S1):25-33. doi:10.1007/s40279-014-0148-z
74. Wilson PB. Multiple Transportable Carbohydrates During Exercise: Current Limitations and Directions for Future Research. *J Strength Cond Res*. juill 2015;29(7):2056-70. doi:10.1519/JSC.0000000000000835 PubMed PMID: 25559901.
75. Fructose co-ingestion to increase carbohydrate availability in athletes - PMC [Internet]. [cité 20 avr 2026]. Disponible sur: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6852172/>
76. Jeukendrup AE. Carbohydrate and exercise performance: the role of multiple transportable carbohydrates. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care*. juill 2010;13(4):452-7. doi:10.1097/MCO.0b013e328339de9f PubMed PMID: 20574242.
77. Cermak NM, Van Loon LJC. The Use of Carbohydrates During Exercise as an Ergogenic Aid. *Sports Med*. nov 2013;43(11):1139-55. doi:10.1007/s40279-013-0079-0

78. Position of the American Dietetic Association, Dietitians of Canada, and the American College of Sports Medicine: Nutrition and Athletic Performance. *J Am Diet Assoc.* mars 2009;109(3):509-27. doi:10.1016/j.jada.2009.01.005
79. Margolis LM, Allen JT, Hatch-Mcchesney A, Pasiakos SM. Coingestion of Carbohydrate and Protein on Muscle Glycogen Synthesis after Exercise: A Meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc.* févr 2021;53(2):384-93. doi:10.1249/MSS.0000000000002476
80. Kloby Nielsen LL, Tandrup Lambert MN, Jeppesen PB. The Effect of Ingesting Carbohydrate and Proteins on Athletic Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Nutrients.* 20 mai 2020;12(5):1483. doi:10.3390/nu12051483
81. Witard OC, Hearnis M, Morgan PT. Protein Nutrition for Endurance Athletes: A Metabolic Focus on Promoting Recovery and Training Adaptation. *Sports Med.* juin 2025;55(6):1361-76. doi:10.1007/s40279-025-02203-8
82. Cermak NM, Res PT, De Groot LC, Saris WH, Van Loon LJ. Protein supplementation augments the adaptive response of skeletal muscle to resistance-type exercise training: a meta-analysis. *Am J Clin Nutr.* déc 2012;96(6):1454-64. doi:10.3945/ajcn.112.037556
83. Gleeson M. Interrelationship between Physical Activity and Branched-Chain Amino Acids. *J Nutr.* juin 2005;135(6):1591S-1595S. doi:10.1093/jn/135.6.1591S
84. Areta JL, Burke LM, Ross ML, Camera DM, West DWD, Broad EM, et al. Timing and distribution of protein ingestion during prolonged recovery from resistance exercise alters myofibrillar protein synthesis. *J Physiol.* mai 2013;591(9):2319-31. doi:10.1113/jphysiol.2012.244897
85. Neinast M, Murashige D, Arany Z. Branched Chain Amino Acids. *Annu Rev Physiol.* 10 févr 2019;81(1):139-64. doi:10.1146/annurev-physiol-020518-114455
86. Wolfe RR, Goodenough RD, Wolfe MH, Royle GT, Nadel ER. Isotopic analysis of leucine and urea metabolism in exercising humans. *J Appl Physiol.* 1 févr 1982;52(2):458-66. doi:10.1152/jappl.1982.52.2.458
87. Millward DJ. Post-prandial tracer studies of protein and amino acid utilisation: what can they tell us about human amino acid and protein requirements? *Br J Nutr.* 28 juin 2024;131(12):2005-30. doi:10.1017/S0007114524000734
88. Trommelen J, Van Loon LJC. Quantification and interpretation of postprandial whole-body protein metabolism using stable isotope methodology: a narrative review. *Front Nutr.* 15 mai 2024;11:1391750. doi:10.3389/fnut.2024.1391750
89. Nutrition and Athletic Performance. *Med Sci Sports Exerc.* mars 2016;48(3):543. doi:10.1249/MSS.0000000000000852
90. Hertzler SR, Lieblein-Boff JC, Weiler M, Allgeier C. Plant Proteins: Assessing Their Nutritional Quality and Effects on Health and Physical Function. *Nutrients.* 30 nov 2020;12(12):3704. doi:10.3390/nu12123704
91. Hoffman JR, Falvo MJ. Protein - Which is Best? *J Sports Sci Med.* sept 2004;3(3):118-30. PubMed PMID: 24482589; PubMed Central PMCID: PMC3905294.
92. Gorissen SHM, Crombag JJR, Senden JMG, Waterval WAH, Bierau J, Verdijk LB, et al. Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino Acids.* déc 2018;50(12):1685-95. doi:10.1007/s00726-018-2640-5
93. Mero A. Leucine Supplementation and Intensive Training: *Sports Med.* 1999;27(6):347-58. doi:10.2165/00007256-199927060-00001

94. Kimball SR, Jefferson LS. Signaling Pathways and Molecular Mechanisms through which Branched-Chain Amino Acids Mediate Translational Control of Protein Synthesis. *J Nutr.* janv 2006;136(1):227S-231S. doi:10.1093/jn/136.1.227S
95. Tang JE, Moore DR, Kujbida GW, Tarnopolsky MA, Phillips SM. Ingestion of whey hydrolysate, casein, or soy protein isolate: effects on mixed muscle protein synthesis at rest and following resistance exercise in young men. *J Appl Physiol.* sept 2009;107(3):987-92. doi:10.1152/jappphysiol.00076.2009
96. Zhou HH, Liao Y, Zhou X, Peng Z, Xu S, Shi S, et al. Effects of Timing and Types of Protein Supplementation on Improving Muscle Mass, Strength, and Physical Performance in Adults Undergoing Resistance Training: A Network Meta-Analysis. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 1 janv 2024;34(1):54-64. doi:10.1123/ijsnem.2023-0118 PubMed PMID: 38039960.
97. Phillips SM. The impact of protein quality on the promotion of resistance exercise-induced changes in muscle mass. *Nutr Metab.* déc 2016;13(1):64. doi:10.1186/s12986-016-0124-8
98. Kim J. Pre-sleep casein protein ingestion: new paradigm in post-exercise recovery nutrition. *Phys Act Nutr.* 30 juin 2020;24(2):6-10. doi:10.20463/pan.2020.0009
99. Hassanin AA, Osman A, Atallah OO, El-Saadony MT, Abdelnour SA, Taha HSA, et al. Phylogenetic comparative analysis: Chemical and biological features of caseins (alpha-S-1, alpha-S-2, beta- and kappa-) in domestic dairy animals. *Front Vet Sci.* 15 sept 2022;9:952319. doi:10.3389/fvets.2022.952319
100. Horstman AMH, Huppertz T. Milk proteins: Processing, gastric coagulation, amino acid availability and muscle protein synthesis. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 29 nov 2023;63(30):10267-82. doi:10.1080/10408398.2022.2078782
101. Engelen MPKJ, Rutten EPA, De Castro CLN, Wouters EFM, Schols AMWJ, Deutz NEP. Casein protein results in higher prandial and exercise induced whole body protein anabolism than whey protein in Chronic Obstructive Pulmonary Disease. *Metabolism.* sept 2012;61(9):1289-300. doi:10.1016/j.metabol.2012.03.001
102. Boirie Y, Dangin M, Gachon P, Vasson MP, Maubois JL, Beaufrère B. Slow and fast dietary proteins differently modulate postprandial protein accretion. *Proc Natl Acad Sci.* 23 déc 1997;94(26):14930-5. doi:10.1073/pnas.94.26.14930
103. Kalman D. Amino Acid Composition of an Organic Brown Rice Protein Concentrate and Isolate Compared to Soy and Whey Concentrates and Isolates. *Foods.* 30 juin 2014;3(3):394-402. doi:10.3390/foods3030394
104. Dimina L, Rémond D, Huneau JF, Mariotti F. Combining Plant Proteins to Achieve Amino Acid Profiles Adapted to Various Nutritional Objectives—An Exploratory Analysis Using Linear Programming. *Front Nutr.* 3 févr 2022;8:809685. doi:10.3389/fnut.2021.809685
105. Lynch HM, Buman MP, Dickinson JM, Ransdell LB, Johnston CS, Wharton CM. No Significant Differences in Muscle Growth and Strength Development When Consuming Soy and Whey Protein Supplements Matched for Leucine Following a 12 Week Resistance Training Program in Men and Women: A Randomized Trial. *Int J Environ Res Public Health.* 29 mai 2020;17(11):3871. doi:10.3390/ijerph17113871
106. Marsh KA, Munn EA, Baines SK. Protein and vegetarian diets. *Med J Aust.* 19 août 2013;199(S4):S7-10. doi:10.5694/mja11.11492 PubMed PMID: 25369930.
107. Juraschek SP, Appel LJ, Anderson CAM, Miller ER. Effect of a High-Protein Diet on Kidney Function in Healthy Adults: Results From the OmniHeart Trial. *Am J Kidney Dis.* avr 2013;61(4):547-54. doi:10.1053/j.ajkd.2012.10.017

108. Poortmans JR, Dellalieux O. Do Regular High Protein Diets Have Potential Health Risks on Kidney Function in Athletes? *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* mars 2000;10(1):28-38. doi:10.1123/ijnsnem.10.1.28
109. Devries MC, Sithamparapillai A, Brimble KS, Banfield L, Morton RW, Phillips SM. 'Changes in Kidney Function Do Not Differ between Healthy Adults Consuming Higher- Compared with Lower- or Normal-Protein Diets: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Nutr.* nov 2018;148(11):1760-75. doi:10.1093/jn/nxy197
110. Van Elswyk ME, Weatherford CA, McNeill SH. A Systematic Review of Renal Health in Healthy Individuals Associated with Protein Intake above the US Recommended Daily Allowance in Randomized Controlled Trials and Observational Studies. *Adv Nutr.* juill 2018;9(4):404-18. doi:10.1093/advances/nmy026
111. Ko G, Kalantar-Zadeh K, Goldstein-Fuchs J, Rhee C. Dietary Approaches in the Management of Diabetic Patients with Kidney Disease. *Nutrients.* 31 juill 2017;9(8):824. doi:10.3390/nu9080824
112. Kasiske B, Lakatua J, Ma J, Louis T. A meta-analysis of the effects of dietary protein restriction on the rate of decline in renal function. *Am J Kidney Dis.* juin 1998;31(6):954-61. doi:10.1053/ajkd.1998.v31.pm9631839
113. Wu S, Bhat Z, Gounder R, Mohamed Ahmed I, Al-Juhaimi F, Ding Y, et al. Effect of Dietary Protein and Processing on Gut Microbiota—A Systematic Review. *Nutrients.* 20 janv 2022;14(3):453. doi:10.3390/nu14030453
114. Konozy EHE, Osman MEM. From inflammation to immune regulation: The dual nature of dietary lectins in health and disease. *Heliyon.* 18 oct 2024;10(20):e39471. doi:10.1016/j.heliyon.2024.e39471 PubMed PMID: 39502251; PubMed Central PMCID: PMC11535980.
115. Les FODMAPs, des sucres qui altèrent la barrière intestinale · Inserm, La science pour la santé. Inserm [Internet]. [cité 23 avr 2026]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/actualite/les-fodmaps-des-sucres-qui-alterent-la-barriere-intestinale/>
116. Goosenberg E, Afzal M. Lactose Intolerance. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2026 [cité 23 avr 2026]. Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK532285/> PubMed PMID: 30335318.
117. Muscella A, Stefàno E, Lunetti P, Capobianco L, Marsigliante S. The Regulation of Fat Metabolism during Aerobic Exercise. *Biomolecules.* 21 déc 2020;10(12):1699. doi:10.3390/biom10121699
118. Jeukendrup AE. Modulation of carbohydrate and fat utilization by diet, exercise and environment. *Biochem Soc Trans.* 1 déc 2003;31(6):1270-3. doi:10.1042/bst0311270
119. Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles [Internet]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2012SA0103Ra-2.pdf>
120. Genton L, Melzer K, Pichard C. Energy and macronutrient requirements for physical fitness in exercising subjects. *Clin Nutr.* août 2010;29(4):413-23. doi:10.1016/j.clnu.2010.02.002
121. Shimomura Y, Yamamoto Y, Bajotto G, Sato J, Murakami T, Shimomura N, et al. Nutraceutical Effects of Branched-Chain Amino Acids on Skeletal Muscle. *J Nutr.* févr 2006;136(2):529S-532S. doi:10.1093/jn/136.2.529S
122. Martínez-Sanz JM. EFECTOS DE LOS AMINOÁCIDOS RAMIFICADOS EN DEPORTES DE LARGA DURACIÓN: *Nutr Hosp.* 1 févr 2015;(2):577-89. doi:10.3305/nh.2015.31.2.7852
123. Dimou A, Tsimihodimos V, Bairaktari E. The Critical Role of the Branched Chain Amino Acids (BCAAs) Catabolism-Regulating Enzymes, Branched-Chain Aminotransferase (BCAT) and Branched-Chain α -Keto

Acid Dehydrogenase (BCKD), in Human Pathophysiology. *Int J Mol Sci.* 5 avr 2022;23(7):4022. doi:10.3390/ijms23074022

124. Drummond MJ, Rasmussen BB. Leucine-enriched nutrients and the regulation of mammalian target of rapamycin signalling and human skeletal muscle protein synthesis: *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* mai 2008;11(3):222-6. doi:10.1097/MCO.0b013e3282fa17fb
125. Arroyo-Cerezo A, Cerrillo I, Ortega Á, Fernández-Pachón MS. Intake of branched chain amino acids favors post-exercise muscle recovery and may improve muscle function: optimal dosage regimens and consumption conditions. *J Sports Med Phys Fitness.* oct 2021;61(11). doi:10.23736/S0022-4707.21.11843-2
126. Khemtong C, Kuo CH, Chen CY, Jaime SJ, Condello G. Does Branched-Chain Amino Acids (BCAAs) Supplementation Attenuate Muscle Damage Markers and Soreness after Resistance Exercise in Trained Males? A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *Nutrients.* 31 mai 2021;13(6):1880. doi:10.3390/nu13061880
127. Coombes JS, McNaughton LR. Effects of branched-chain amino acid supplementation on serum creatine kinase and lactate dehydrogenase after prolonged exercise. *J Sports Med Phys Fitness.* sept 2000;40(3):240-6. PubMed PMID: 11125767.
128. Iwasawa Y, Kishi T, Morita M, Ikeda K, Shima H, Sato T. Optimal Ratio of Individual Branched-Chain Amino Acids in Total Parenteral Nutrition of Injured Rats. *J Parenter Enter Nutr.* nov 1991;15(6):612-8. doi:10.1177/0148607191015006612
129. Martinho DV, Nobari H, Faria A, Field A, Duarte D, Sarmento H. Oral Branched-Chain Amino Acids Supplementation in Athletes: A Systematic Review. *Nutrients.* 27 sept 2022;14(19):4002. doi:10.3390/nu14194002
130. Mirveis Z, Howe O, Cahill P, Patil N, Byrne HJ. Monitoring and modelling the glutamine metabolic pathway: a review and future perspectives. *Metabolomics Off J Metabolomic Soc.* 23 juill 2023;19(8):67. doi:10.1007/s11306-023-02031-9 PubMed PMID: 37482587; PubMed Central PMCID: PMC10363518.
131. Newsholme P, Procopio J, Lima MMR, Pithon-Curi TC, Curi R. Glutamine and glutamate—their central role in cell metabolism and function. *Cell Biochem Funct.* mars 2003;21(1):1-9. doi:10.1002/cbf.1003
132. Nicklin P, Bergman P, Zhang B, Triantafellow E, Wang H, Nyfeler B, et al. Bidirectional Transport of Amino Acids Regulates mTOR and Autophagy. *Cell.* févr 2009;136(3):521-34. doi:10.1016/j.cell.2008.11.044
133. Lambertucci AC, Lambertucci RH, Hirabara SM, Curi R, Moriscot AS, Alba-Loureiro TC, et al. Glutamine Supplementation Stimulates Protein-Synthetic and Inhibits Protein-Degradative Signaling Pathways in Skeletal Muscle of Diabetic Rats. Blachier F, éditeur. *PLoS ONE.* 11 déc 2012;7(12):e50390. doi:10.1371/journal.pone.0050390
134. Deldicque L, Sanchez Canedo C, Horman S, De Potter I, Bertrand L, Hue L, et al. Antagonistic effects of leucine and glutamine on the mTOR pathway in myogenic C2C12 cells. *Amino Acids.* juin 2008;35(1):147-55. doi:10.1007/s00726-007-0607-z
135. Córdova-Martínez A, Caballero-García A, Bello HJ, Pérez-Valdecantos D, Roche E. Effect of Glutamine Supplementation on Muscular Damage Biomarkers in Professional Basketball Players. *Nutrients.* 17 juin 2021;13(6):2073. doi:10.3390/nu13062073
136. Castell LM, Newsholme EA. The effects of oral glutamine supplementation on athletes after prolonged, exhaustive exercise. *Nutrition.* juill 1997;13(7-8):738-42. doi:10.1016/S0899-9007(97)83036-5
137. Gleeson M. Dosing and Efficacy of Glutamine Supplementation in Human Exercise and Sport Training. *J Nutr.* oct 2008;138(10):2045S-2049S. doi:10.1093/jn/138.10.2045S

138. OPINION of the French Agency for Food, Environmental and Occupational Health & Safety, Directeur general de l'ANSES, Maisons-Alfort, 26 May 2011 [Internet]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2007sa0314EN.pdf>
139. Les compléments alimentaires destinés aux sportifs Avis de l'Anses Rapport d'expertise collective, Anses, Novembre 2016 [Internet]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/system/files/NUT2014SA0008Ra.pdf>
140. Baker LB. Sweating Rate and Sweat Sodium Concentration in Athletes: A Review of Methodology and Intra/Interindividual Variability. *Sports Med.* mars 2017;47(S1):111-28. doi:10.1007/s40279-017-0691-5
141. Keefe MS, Benjamin CL, Casa DJ, Sekiguchi Y. Importance of Electrolytes in Exercise Performance and Assessment Methodology After Heat Training: A Narrative Review. *Appl Sci.* 5 nov 2024;14(22):10103. doi:10.3390/app142210103
142. Lara B, Gallo-Salazar C, Puente C, Areces F, Salinero JJ, Del Coso J. Interindividual variability in sweat electrolyte concentration in marathoners. *J Int Soc Sports Nutr.* 5 janv 2016;13(1):31. doi:10.1186/s12970-016-0141-z
143. Baker LB, Barnes KA, Anderson ML, Passe DH, Stofan JR. Normative data for regional sweat sodium concentration and whole-body sweating rate in athletes. *J Sports Sci.* 16 févr 2016;34(4):358-68. doi:10.1080/02640414.2015.1055291
144. Rehrer NJ. Fluid and Electrolyte Balance in Ultra-Endurance Sport: *Sports Med.* 2001;31(10):701-15. doi:10.2165/00007256-200131100-00001
145. Armstrong LE. Rehydration during Endurance Exercise: Challenges, Research, Options, Methods. *Nutrients.* 9 mars 2021;13(3):887. doi:10.3390/nu13030887
146. Exercise and Fluid Replacement. *Med Sci Sports Exerc.* févr 2007;39(2):377. doi:10.1249/mss.0b013e31802ca597
147. Knechtle B, Chlíbková D, Papadopoulou S, Mantzourou M, Rosemann T, Nikolaidis PT. Exercise-Associated Hyponatremia in Endurance and Ultra-Endurance Performance—Aspects of Sex, Race Location, Ambient Temperature, Sports Discipline, and Length of Performance: A Narrative Review. *Medicina (Mex).* 26 août 2019;55(9):537. doi:10.3390/medicina55090537
148. Klingert M, Nikolaidis PT, Weiss K, Thuany M, Chlíbková D, Knechtle B. Exercise-Associated Hyponatremia in Marathon Runners. *J Clin Med.* 16 nov 2022;11(22):6775. doi:10.3390/jcm11226775
149. Buck E, McAllister R, Schroeder JD. Exercise-Associated Hyponatremia. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2025 [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK572128/> PubMed PMID: 34283494.
150. Veniamakis E, Kaplanis G, Voulgaris P, Nikolaidis PT. Effects of Sodium Intake on Health and Performance in Endurance and Ultra-Endurance Sports. *Int J Environ Res Public Health.* 19 mars 2022;19(6):3651. doi:10.3390/ijerph19063651
151. Garrison SR, Korownyk CS, Kolber MR, Allan GM, Musini VM, Sekhon RK, et al. Magnesium for skeletal muscle cramps. *Cochrane Neuromuscular Group*, éditeur. *Cochrane Database Syst Rev.* 21 sept 2020;2020(9). doi:10.1002/14651858.CD009402.pub3
152. Nielsen FH, Lukaski HC. Update on the relationship between magnesium and exercise. *Magnes Res.* sept 2006;19(3):180-9. PubMed PMID: 17172008.
153. Bomar MC, Ewell TR, Brown RL, Brown DM, Kwarteng BS, Abbotts KSS, et al. Short-Term Magnesium Supplementation Has Modest Detrimental Effects on Cycle Ergometer Exercise Performance and Skeletal

- Muscle Mitochondria and Negligible Effects on the Gut Microbiota: A Randomized Crossover Clinical Trial. *Nutrients*. 6 mars 2025;17(5):915. doi:10.3390/nu17050915
154. Fiorentini D, Cappadone C, Farruggia G, Prata C. Magnesium: Biochemistry, Nutrition, Detection, and Social Impact of Diseases Linked to Its Deficiency. *Nutrients*. 30 mars 2021;13(4):1136. doi:10.3390/nu13041136
 155. Colaneri-Day S, Rosanoff A. Clinical Guideline for Detection and Management of Magnesium Deficiency in Ambulatory Care. *Nutrients*. 28 févr 2025;17(5):887. doi:10.3390/nu17050887
 156. nhs.uk [Internet]. 2017 [cité 2 mars 2026]. Vitamins and minerals. Disponible sur: <https://www.nhs.uk/conditions/vitamins-and-minerals/>
 157. Murray D, Miller KC, Edwards JE. Does a Reduction in Serum Sodium Concentration or Serum Potassium Concentration Increase the Prevalence of Exercise-Associated Muscle Cramps? *J Sport Rehabil*. août 2016;25(3):301-4. doi:10.1123/jsr.2014-0293
 158. Schwellnus MP, Drew N, Collins M. Increased running speed and previous cramps rather than dehydration or serum sodium changes predict exercise-associated muscle cramping: a prospective cohort study in 210 Ironman triathletes. *Br J Sports Med*. juin 2011;45(8):650-6. doi:10.1136/bjsm.2010.078535
 159. Hoffman MD, Stuenkel KJ, Valentino T. Sodium Intake During an Ultramarathon Does Not Prevent Muscle Cramping, Dehydration, Hyponatremia, or Nausea. *Sports Med - Open*. déc 2015;1(1):39. doi:10.1186/s40798-015-0040-x
 160. Nelson NL, Churilla JR. A narrative review of exercise-associated muscle cramps: Factors that contribute to neuromuscular fatigue and management implications: Exercise-Associated Muscle Cramps. *Muscle Nerve*. août 2016;54(2):177-85. doi:10.1002/mus.25176
 161. Jahic D, Begic E. Exercise-Associated Muscle Cramp-Doubts About the Cause. *Mater Socio Medica*. 2018;30(1):67. doi:10.5455/msm.2018.30.67-69
 162. Giuriato G, Pedrinolla A, Schena F, Venturelli M. Muscle cramps: A comparison of the two-leading hypothesis. *J Electromyogr Kinesiol*. août 2018;41:89-95. doi:10.1016/j.jelekin.2018.05.006
 163. Lindinger MI, Cairns SP. Regulation of muscle potassium: exercise performance, fatigue and health implications. *Eur J Appl Physiol*. mars 2021;121(3):721-48. doi:10.1007/s00421-020-04546-8
 164. Haas JD, Brownlie T. Iron Deficiency and Reduced Work Capacity: A Critical Review of the Research to Determine a Causal Relationship. *J Nutr*. févr 2001;131(2):676S-690S. doi:10.1093/jn/131.2.676S
 165. Pengelly M, Puma K, Pyne DB, Etxebarria N. Iron deficiency, supplementation, and sports performance in female athletes: A systematic review. *J Sport Health Sci*. déc 2025;14:101009. doi:10.1016/j.jshs.2024.101009
 166. Nolte S, Krüger K, Hollander K, Carlsohn A. Approaches to Prevent Iron Deficiency in Athletes. *Ger J Sports Med*. 20 août 2024;75:195-202. doi:10.5960/dzsm.2024.607
 167. Kardasis W, Naquin ER, Garg R, Arun T, Gopalanand JS, Karmakar E, et al. The IRONY in Athletic Performance. *Nutrients*. 28 nov 2023;15(23):4945. doi:10.3390/nu15234945 PubMed PMID: 38068803; PubMed Central PMCID: PMC10708480.
 168. Rineau E, Gueguen N, Procaccio V, Geneviève F, Reynier P, Henrion D, et al. Iron Deficiency without Anemia Decreases Physical Endurance and Mitochondrial Complex I Activity of Oxidative Skeletal Muscle in the Mouse. *Nutrients*. 24 mars 2021;13(4):1056. doi:10.3390/nu13041056 PubMed PMID: 33805065; PubMed Central PMCID: PMC8064065.

169. Sims ST, Mackay K, Leabeater A, Clarke A, Schofield K, Driller M. High Prevalence of Iron Deficiency Exhibited in Internationally Competitive, Non-Professional Female Endurance Athletes—A Case Study. *Int J Environ Res Public Health*. 10 déc 2022;19(24):16606. doi:10.3390/ijerph192416606
170. Les références nutritionnelles en vitamines et minéraux | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/les-references-nutritionnelles-en-vitamines-et-mineraux>
171. Sareen S. Gropper/Jack L. Smith/Timothy P. Carr, *Advanced Nutrition and Human Metabolism*.
172. Tardy AL, Pouteau E, Marquez D, Yilmaz C, Scholey A. Vitamins and Minerals for Energy, Fatigue and Cognition: A Narrative Review of the Biochemical and Clinical Evidence. *Nutrients*. 16 janv 2020;12(1):228. doi:10.3390/nu12010228
173. Plantone D, Pardini M, Rinaldi G. Riboflavin in Neurological Diseases: A Narrative Review. *Clin Drug Investig*. juin 2021;41(6):513-27. doi:10.1007/s40261-021-01038-1
174. Ghazzawi HA, Hussain MA, Raziq KM, Alsendi KK, Alaamer RO, Jaradat M, et al. Exploring the Relationship between Micronutrients and Athletic Performance: A Comprehensive Scientific Systematic Review of the Literature in Sports Medicine. *Sports*. 24 mai 2023;11(6):109. doi:10.3390/sports11060109
175. Horváth Z, Vecsei L. Current medical aspects of pantethine: Treatment strategies. *Ideggyógy Szle*. 1 août 2009;62:220-9.
176. Biological properties of vitamins of the B-complex, part 2 – vitamins B6 and B7 (biotin, vitamin H) | Nutrition Research Reviews | Cambridge Core [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.cambridge.org/core/journals/nutrition-research-reviews/article/biological-properties-of-vitamins-of-the-bcomplex-part-2-vitamins-b6-and-b7-biotin-vitamin-h/572948DC89F3388EE25D2A6DF116F467>
177. Zempleni J, Wijeratne SSK, Hassan YI. Biotin. *BioFactors*. janv 2009;35(1):36-46. doi:10.1002/biof.8
178. Perry CA, Butterick TA. Biotin. *Adv Nutr*. juill 2024;15(7):100251. doi:10.1016/j.advnut.2024.100251
179. O'Leary F, Samman S. Vitamin B12 in Health and Disease. *Nutrients*. 5 mars 2010;2(3):299-316. doi:10.3390/nu2030299
180. Green R, Allen LH, Bjørke-Monsen AL, Brito A, Guéant JL, Miller JW, et al. Vitamin B12 deficiency. *Nat Rev Dis Primer*. 29 juin 2017;3:17040. doi:10.1038/nrdp.2017.40 PubMed PMID: 28660890.
181. Low vitamin C values are linked with decreased physical performance and increased oxidative stress: reversal by vitamin C supplementation - PubMed [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25526969/>
182. Li S, Fasipe B, Laher I. Potential harms of supplementation with high doses of antioxidants in athletes. *J Exerc Sci Fit*. oct 2022;20(4):269-75. doi:10.1016/j.jesf.2022.06.001
183. Khassaf M, McArdle A, Esanu C, Vasilaki A, McArdle F, Griffiths RD, et al. Effect of Vitamin C Supplements on Antioxidant Defence and Stress Proteins in Human Lymphocytes and Skeletal Muscle. *J Physiol*. juin 2003;549(2):645-52. doi:10.1113/jphysiol.2003.040303
184. Timoshnikov VA, Kobzeva TV, Polyakov NE, Kontoghiorghe GJ. Redox Interactions of Vitamin C and Iron: Inhibition of the Pro-Oxidant Activity by Deferiprone. *Int J Mol Sci*. 31 mai 2020;21(11):3967. doi:10.3390/ijms21113967

185. Keya TA, Leela A, Fernandez K, Habib N, Rashid M. Effect of Vitamin C Supplements on Respiratory Tract Infections: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Curr Rev Clin Exp Pharmacol*. nov 2022;17(3):205-15. doi:10.2174/2772432817666211230100723
186. Murad S, Grove D, Lindberg KA, Reynolds G, Sivarajah A, Pinnell SR. Regulation of collagen synthesis by ascorbic acid. *Proc Natl Acad Sci*. mai 1981;78(5):2879-82. doi:10.1073/pnas.78.5.2879
187. Lynch SR, Cook JD. Interaction of vitamin C and iron. *Ann N Y Acad Sci*. 1980;355:32-44. doi:10.1111/j.1749-6632.1980.tb21325.x PubMed PMID: 6940487.
188. Gohil K, Packer L, De Lumen B, Brooks GA, Terblanche SE. Vitamin E deficiency and vitamin C supplements: exercise and mitochondrial oxidation. *J Appl Physiol*. 1 juin 1986;60(6):1986-91. doi:10.1152/jappl.1986.60.6.1986
189. Avery NG, Kaiser JL, Sharman MJ, Scheett TP, Barnes DM, Gómez AL, et al. Effects of vitamin E supplementation on recovery from repeated bouts of resistance exercise. *J Strength Cond Res*. nov 2003;17(4):801-9. doi:10.1519/1533-4287(2003)017<0801:eoveso>2.0.co;2 PubMed PMID: 14636105.
190. Davis JM, Murphy EA, McClellan JL, Carmichael MD, Gangemi JD. Quercetin reduces susceptibility to influenza infection following stressful exercise. *Am J Physiol-Regul Integr Comp Physiol*. août 2008;295(2):R505-9. doi:10.1152/ajpregu.90319.2008
191. Somerville V, Bringans C, Braakhuis A. Polyphenols and Performance: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med*. août 2017;47(8):1589-99. doi:10.1007/s40279-017-0675-5
192. King JC, Brown KH, Gibson RS, Krebs NF, Lowe NM, Siekmann JH, et al. Biomarkers of Nutrition for Development (BOND)—Zinc Review. *J Nutr*. avr 2016;146(4):858S-885S. doi:10.3945/jn.115.220079
193. Connolly DAJ, McHugh MP, Padilla-Zakour OI. Efficacy of a tart cherry juice blend in preventing the symptoms of muscle damage. *Br J Sports Med*. août 2006;40(8):679-83. doi:10.1136/bjsm.2005.025429
194. Carey CC, Lucey A, Doyle L. Flavonoid Containing Polyphenol Consumption and Recovery from Exercise-Induced Muscle Damage: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med*. juin 2021;51(6):1293-316. doi:10.1007/s40279-021-01440-x
195. Cao G, Zuo J, Wu B, Wu Y. Polyphenol supplementation boosts aerobic endurance in athletes: systematic review. *Front Physiol*. 8 avr 2024;15:1369174. doi:10.3389/fphys.2024.1369174
196. Micheletti A, Rossi R, Rufini S. Zinc Status in Athletes: Relation to Diet and Exercise. *Sports Med*. 2001;31(8):577-82. doi:10.2165/00007256-200131080-00002
197. Coleman JE. Zinc proteins: enzymes, storage proteins, transcription factors, and replication proteins. *Annu Rev Biochem*. 1992;61:897-946. doi:10.1146/annurev.bi.61.070192.004341 PubMed PMID: 1497326.
198. Kiouri DP, Tsoupra E, Peana M, Perlepes SP, Stefanidou ME, Chasapis CT. Multifunctional role of zinc in human health: an update. *EXCLI J* 22Doc809 ISSN 1611-2156. 2023. doi:10.17179/EXCLI2023-6335
199. LUBOMIR PETROV, ALBENA ALEXANDROVA, RASHO MAKAVEEV, RADOSLAV PENOV, IVETA BONOVA, STEFAN KOLIMECHKOV (2022). Copper, selenium, zinc, and iron deficiencies in male athletes. *Journal of Physical Education and Sport*® (JPES), Vol. 22 (issue 2), Art 53, pp. 423 - 429, February 2022. DOI:10.7752/jpes.2022.02053. [Internet]. Disponible sur: <https://efsupit.ro/images/stories/februarie2022/Art%2053.pdf>
200. Chasapis CT, Loutsidou AC, Spiliopoulou CA, Stefanidou ME. Zinc and human health: an update. *Arch Toxicol*. avr 2012;86(4):521-34. doi:10.1007/s00204-011-0775-1

201. Cordova A. Behaviour of zinc in physical exercise: A special reference to immunity and fatigue. *Neurosci Biobehav Rev.* 1995;19(3):439-45. doi:10.1016/0149-7634(95)00002-V
202. Chu A, Holdaway C, Varma T, Petocz P, Samman S. Lower Serum Zinc Concentration Despite Higher Dietary Zinc Intake in Athletes: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Med.* févr 2018;48(2):327-36. doi:10.1007/s40279-017-0818-8
203. Rakhra G, Masih D, Vats A, Verma SK, Singh VK, Kirar V, et al. Effect of endurance training on copper, zinc, iron and magnesium status. *J Sports Med Phys Fitness.* oct 2021;61(9). doi:10.23736/S0022-4707.21.11647-0
204. Fernández-Lázaro D, Fernandez-Lazaro CI, Mielgo-Ayuso J, Navascués LJ, Córdova Martínez A, Seco-Calvo J. The Role of Selenium Mineral Trace Element in Exercise: Antioxidant Defense System, Muscle Performance, Hormone Response, and Athletic Performance. A Systematic Review. *Nutrients.* 16 juin 2020;12(6):1790. doi:10.3390/nu12061790
205. Guest NS, VanDusseldorp TA, Nelson MT, Grgic J, Schoenfeld BJ, Jenkins NDM, et al. International society of sports nutrition position stand: caffeine and exercise performance. *J Int Soc Sports Nutr.* 2 janv 2021;18(1):1. doi:10.1186/s12970-020-00383-4
206. Doherty M, Smith PM. Effects of caffeine ingestion on rating of perceived exertion during and after exercise: a meta-analysis. *Scand J Med Sci Sports.* avr 2005;15(2):69-78. doi:10.1111/j.1600-0838.2005.00445.x
207. Doherty M, Smith PM, Hughes MG, Davison RR. Caffeine lowers perceptual response and increases power output during high-intensity cycling. *J Sports Sci.* juill 2004;22(7):637-43. doi:10.1080/02640410310001655741
208. Wang Z, Qiu B, Gao J, Del Coso J. Effects of Caffeine Intake on Endurance Running Performance and Time to Exhaustion: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Nutrients.* 28 déc 2022;15(1):148. doi:10.3390/nu15010148
209. Grgic J, Del Coso J. Ergogenic Effects of Acute Caffeine Intake on Muscular Endurance and Muscular Strength in Women: A Meta-Analysis. *Int J Environ Res Public Health.* 27 mai 2021;18(11):5773. doi:10.3390/ijerph18115773
210. Warren GL, Park ND, Maresca RD, Mckibans KI, Millard-Stafford ML. Effect of Caffeine Ingestion on Muscular Strength and Endurance: A Meta-Analysis. *Med Sci Sports Exerc.* juill 2010;42(7):1375-87. doi:10.1249/MSS.0b013e3181cabbdb8
211. Grgic J, Grgic I, Pickering C, Schoenfeld BJ, Bishop DJ, Pedisic Z. Wake up and smell the coffee: caffeine supplementation and exercise performance—an umbrella review of 21 published meta-analyses. *Br J Sports Med.* juin 2020;54(11):681-8. doi:10.1136/bjsports-2018-100278
212. Martins GL, Guilherme JPLF, Ferreira LHB, De Souza-Junior TP, Lancha AH. Caffeine and Exercise Performance: Possible Directions for Definitive Findings. *Front Sports Act Living.* 11 déc 2020;2:574854. doi:10.3389/fspor.2020.574854
213. Pickering C, Kiely J. Are the Current Guidelines on Caffeine Use in Sport Optimal for Everyone? Inter-individual Variation in Caffeine Ergogenicity, and a Move Towards Personalised Sports Nutrition. *Sports Med.* janv 2018;48(1):7-16. doi:10.1007/s40279-017-0776-1
214. De Souza JG, Del Coso J, Fonseca FDS, Silva BVC, De Souza DB, Da Silva Gianoni RL, et al. Risk or benefit? Side effects of caffeine supplementation in sport: a systematic review. *Eur J Nutr.* déc 2022;61(8):3823-34. doi:10.1007/s00394-022-02874-3

215. Agence mondiale antidopage [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Nutritional Supplements - still a risk of inadvertent doping? An extended WADA follow up study of the international ICO study from 2002. Disponible sur: <https://www.wada-ama.org/fr/ressources/recherche-scientifique/nutritional-supplements-still-risk-inadvertent-doping-extended>
216. Kozhuharov VR, Ivanov K, Ivanova S. Dietary Supplements as Source of Unintentional Doping. Jakovljevic M, éditeur. BioMed Res Int. janv 2022;2022(1):8387271. doi:10.1155/2022/8387271
217. Helle C, Sommer AK, Syversen PV, Lauritzen F. Dopingmidler i kosttilskudd. Tidsskr Den Nor Legeforening. 2019. doi:10.4045/tidsskr.18.0502
218. CODE MONDIAL ANTIDOPAGE 2015 avec amendements de 2019 [Internet]. Disponible sur: https://www.wada-ama.org/sites/default/files/resources/files/wada_anti-doping_code_2019_french_final_revised_v1_linked.pdf
219. Goebel C, Trout GJ, Kazlauskas R. Rapid screening method for diuretics in doping control using automated solid phase extraction and liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry. Anal Chim Acta. janv 2004;502(1):65-74. doi:10.1016/j.aca.2003.09.062
220. Article L232-23-3-3 - Code du sport - Légifrance [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043414794
221. Section 4 : Sanctions administratives, mesures conservatoires et autres conséquences (Articles L232-21 à L232-23-6) - Légifrance [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/section_lc/LEGITEXT000006071318/LEGISCTA000006167047
222. Les dangers du dopage – Onad Monaco [Internet]. 29 mars 2016 [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.onad-monaco.mc/prevention/les-dangers-du-dopage/>
223. Code du sport et Code mondial antidopage. AFLD [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.afld.fr/la-lutte-antidopage/les-regles-antidopage/code-du-sport-et-code-mondial-antidopage/>
224. sports.gouv.fr [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Lutte contre le trafic. Disponible sur: <https://www.sports.gouv.fr/lutte-contre-le-traffic-89>
225. Les pharmaciens mobilisés pour la prévention du dopage, dossier de presse de février 2016 [Internet]. Disponible sur: https://www.ordre.pharmacien.fr/medias/medias/fichiers/communiqués-de-presse/contenus-importés/1389928_finaldopage_dp.pdf
226. CNOP [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Compléments alimentaires et aliments enrichis pour sportifs : des consommations à risque. Disponible sur: <https://www.ordre.pharmacien.fr/les-communications/focus-sur/les-actualités/compléments-alimentaires-et-aliments-enrichis-pour-sportifs-des-consommations-a-risque>
227. Ylitalo P. Effect of Exercise on Pharmacokinetics. Ann Med. janv 1991;23(3):289-94. doi:10.3109/07853899109148062
228. CNOP [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Substances dopantes : liste 2024 et outils pratiques. Disponible sur: <https://www.ordre.pharmacien.fr/les-communications/focus-sur/les-actualités/substances-dopantes-liste-2024-et-outils-pratiques>
229. Liste des interdictions | Agence mondiale antidopage [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.wada-ama.org/fr/liste-des-interdictions>
230. Compléments alimentaires et aliments enrichis pour sportifs : des consommations à risque | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité

2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/complements-alimentaires-et-aliments-enrichis-pour-sportifs-des-consommations-risque>

231. La nutriviigilance | Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Disponible sur: <https://www.anses.fr/fr/content/tout-savoir-sur-le-dispositif-de-nutriviigilance>
232. data.gouv.fr [Internet]. [cité 25 avr 2026]. data.gouv.fr. Disponible sur: <https://www.data.gouv.fr/datasets/repertoire-national-des-certifications-professionnelles-et-repertoire-specifique>
233. Le Quotidien du Pharmacien [Internet]. [cité 2 mars 2026]. Pharmacien du sport, une spécialité pour l'avenir. Disponible sur: <http://www.lequotidiendupharmacien.fr/pharmacien-du-sport-une-specialite-pour-lavenir>

XII. Annexes

12.1. Annexe 1 : Allégations de santé validées par l'EFSA (tiré de (13))

L 12/16

FR

Journal officiel de l'Union européenne

18.1.2007

ANNEXE

Allégations nutritionnelles et conditions applicables à celles-ci

FAIBLE VALEUR ÉNERGÉTIQUE

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire a une faible valeur énergétique, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que pour un produit contenant au maximum 40 kcal (170 kJ)/100 g dans le cas des solides ou au maximum 20 kcal (80 kJ)/100 ml dans le cas des liquides. Dans le cas des édulcorants de table, la limite de 4 kcal (17 kJ)/portion, avec des propriétés édulcorantes équivalentes à 6 g de saccharose (approximativement 1 petite cuillerée de saccharose), s'applique.

VALEUR ÉNERGÉTIQUE RÉDUITE

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire a une valeur énergétique réduite, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si la valeur énergétique est réduite d'au moins 30 %, en indiquant la ou les caractéristiques entraînant la réduction de la valeur énergétique totale de la denrée alimentaire.

SANS APPORT ÉNERGÉTIQUE

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire n'a pas d'apport énergétique, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit contient au maximum 4 kcal (17 kJ)/100 ml. Dans le cas des édulcorants de table, la limite de 0,4 kcal (1,7 kJ)/portion, ayant des propriétés édulcorantes équivalentes à 6 g de saccharose (approximativement 1 petite cuillerée de saccharose), s'applique.

FAIBLE TENEUR EN MATIÈRES GRASSES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire a une faible teneur en matières grasses, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit ne contient pas plus de 3 g de matières grasses par 100 g dans le cas des solides ou 1,5 g de matières grasses par 100 ml dans le cas des liquides (1,8 g de matières grasses par 100 ml pour le lait demi-écrémé).

SANS MATIÈRES GRASSES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire ne contient pas de matières grasses, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit ne contient pas plus de 0,5 g de matières grasses par 100 g ou par 100 ml. Cependant, les allégations du type «à X % sans matières grasses» sont interdites.

FAIBLE TENEUR EN GRAISSES SATURÉES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire a une faible teneur en graisses saturées, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si la somme des acides gras saturés et des acides gras trans contenus dans le produit n'est pas supérieure à 1,5 g par 100 g de solide ou à 0,75 g par 100 ml de liquide, la somme des acides gras saturés et des acides gras trans ne pouvant pas produire, dans les deux cas, plus de 10 % de l'énergie.

FAIBLE TENEUR EN SUCRES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire a une faible teneur en sucres, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit ne contient pas plus de 5 g de sucres par 100 g dans le cas des solides ou 2,5 g de sucres par 100 ml dans le cas des liquides.

SANS SUCRES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire ne contient pas de sucres, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit ne contient pas plus de 0,5 g de sucres par 100 g ou par 100 ml.

SANS SUCRES AJOUTÉS

Une allégation selon laquelle il n'a pas été ajouté de sucres à une denrée alimentaire, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit ne contient pas de monosaccharides ou disaccharides ajoutés ou toute autre denrée alimentaire utilisée pour ses propriétés édulcorantes. Si les sucres sont naturellement présents dans la denrée alimentaire, l'indication suivante devrait également figurer sur l'étiquette: «CONTIENT DES SUCRES NATURELLEMENT PRÉSENTS».

PAUVRE EN SODIUM OU EN SEL

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est pauvre en sodium ou en sel, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit ne contient pas plus de 0,12 g de sodium ou de l'équivalent en sel par 100 g ou par 100 ml. En ce qui concerne les eaux, autres que les eaux minérales naturelles relevant du champ d'application de la directive 80/777/CEE, cette valeur ne devrait pas être supérieure à 2 mg de sodium par 100 ml.

TRÈS PAUVRE EN SODIUM OU EN SEL

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est très pauvre en sodium ou en sel, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit ne contient pas plus de 0,04 g de sodium ou de l'équivalent en sel par 100 g ou 100 ml. Il est interdit d'utiliser cette allégation pour les eaux minérales naturelles et les autres eaux.

SANS SODIUM OU SANS SEL

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire ne contient pas de sodium ou de sel, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit ne contient pas plus de 0,005 g de sodium ou de l'équivalent en sel par 100 g.

SOURCE DE FIBRES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est une source de fibres, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit contient au moins 3 g de fibres par 100 g ou au moins 1,5 g de fibres par 100 kcal.

RICHE EN FIBRES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est riche en fibres, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit contient au moins 6 g de fibres par 100 g ou au moins 3 g de fibres par 100 kcal.

SOURCE DE PROTÉINES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est une source de protéines, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si 12 % au moins de la valeur énergétique de la denrée alimentaire sont produits par des protéines.

RICHE EN PROTÉINES

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est riche en protéines, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si 20 % au moins de la valeur énergétique de la denrée alimentaire sont produits par des protéines.

SOURCE DE [NOM DES VITAMINES] ET/OU [NOM DES MINÉRAUX]

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est une source de vitamines et/ou de minéraux, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit contient au moins la quantité significative définie à l'annexe de la directive 90/496/CEE ou une quantité prévue au titre de dérogations accordées conformément à l'article 6 du règlement (CE) n° 1925/2006 du Parlement européen et du Conseil du 20 décembre 2006 concernant l'adjonction de vitamines, de minéraux et de certaines autres substances aux denrées alimentaires ⁽¹⁾.

RICHE EN [NOM DES VITAMINES] ET/OU EN [NOM DES MINÉRAUX]

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire est riche en vitamines et/ou en minéraux, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit contient au moins deux fois la teneur requise pour l'allégation «source de [NOM DES VITAMINES] et/ou [NOM DES MINÉRAUX]».

CONTIENT [NOM DU NUTRIMENT OU D'UNE AUTRE SUBSTANCE]

Une allégation selon laquelle une denrée alimentaire contient un nutriment ou une autre substance pour lequel ou laquelle le présent règlement ne fixe pas de conditions particulières, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit respecte toutes les dispositions applicables du présent règlement, et notamment l'article 5. Pour les vitamines et les minéraux, les conditions prévues pour l'allégation «source de» s'appliquent.

ENRICHI EN (NOM DU NUTRIMENT)

Une allégation affirmant que la teneur en un ou plusieurs nutriments, autres que des vitamines ou des minéraux, a été augmentée, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si le produit remplit les conditions applicables à l'allégation «source de» et si l'augmentation de cette teneur est d'au moins 30 % par rapport à un produit similaire.

RÉDUIT EN (NOM DU NUTRIMENT)

Une allégation affirmant que la teneur en un ou plusieurs nutriments a été réduite, ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, ne peut être faite que si la réduction de cette teneur est d'au moins 30 % par rapport à un produit similaire, sauf s'il s'agit de micronutriments, pour lesquels une différence de 10 % par rapport aux valeurs de référence fixées par la directive 90/496/CEE est admissible, ou s'il s'agit de sodium ou d'équivalent en sel, pour lesquels une différence de 25 % est admissible.

ALLÉGÉ/LIGHT

Une allégation selon laquelle un produit est «allégé» ou «light», ou toute autre allégation susceptible d'avoir le même sens pour le consommateur, doit remplir les mêmes conditions que celles applicables aux termes «réduit en»; elle doit aussi être accompagnée d'une indication de la ou les caractéristiques entraînant l'allégement de la denrée alimentaire.

NATURELLEMENT/NATUREL

Lorsqu'une denrée alimentaire remplit naturellement la ou les conditions fixées dans la présente annexe pour l'utilisation d'une allégation nutritionnelle, le terme «naturellement/naturel» peut accompagner cette allégation.

12.2. Annexe 2 : questionnaire structuré d'évaluation du sportif d'endurance et arbre décisionnel

1. Identité et profil du sportif

- Nom, prénom :
- Âge :
- Sexe :
- Poids / Taille :
- Profession / Statut (amateur, compétiteur, professionnel) :

2. Pratique sportive

- Discipline(s) pratiquée(s) :
- Fréquence des entraînements (par semaine) :
- Durée moyenne des séances :
- Intensité habituelle (faible / modérée / élevée) :
- Ancienneté dans la pratique :
- Objectifs actuels (performance, récupération, perte de poids, prévention des blessures, autres) :

3. Habitudes alimentaires

- Type de régime alimentaire (omnivore, végétarien, végétalien, autre) :
- Nombre de repas/jour :
- Consommation régulière de produits laitiers, viande, poisson, œufs :
- Consommation de fruits et légumes (nombre de portions/jour) :
- Utilisation actuelle de compléments alimentaires ? (oui/non)
 - Si oui, lesquels ? (Préciser marque, posologie, durée d'utilisation)

4. Antécédents médicaux et facteurs de risque

- Antécédents médicaux personnels (maladies chroniques, troubles digestifs, pathologies hépatiques/rénales, allergies, intolérances) :
- Antécédents familiaux notables :
- Traitements en cours (médicaments, automédication) :
- Antécédents de blessures ou de surentraînement :
- Tabac, alcool, autres substances :

5. Symptômes ou problèmes récurrents

- Fatigue chronique :
- Troubles digestifs à l'effort ou au repos :
- Crampes, douleurs musculaires, blessures fréquentes :
- Troubles du sommeil :
- Autres symptômes (préciser) :

6. Hydratation et gestion de l'effort

- Quantité d'eau bue par jour (hors entraînement) :
- Stratégie d'hydratation pendant l'effort :
- Utilisation de boissons énergétiques ou de récupération (préciser) :

7. Connaissances et attentes vis-à-vis des compléments

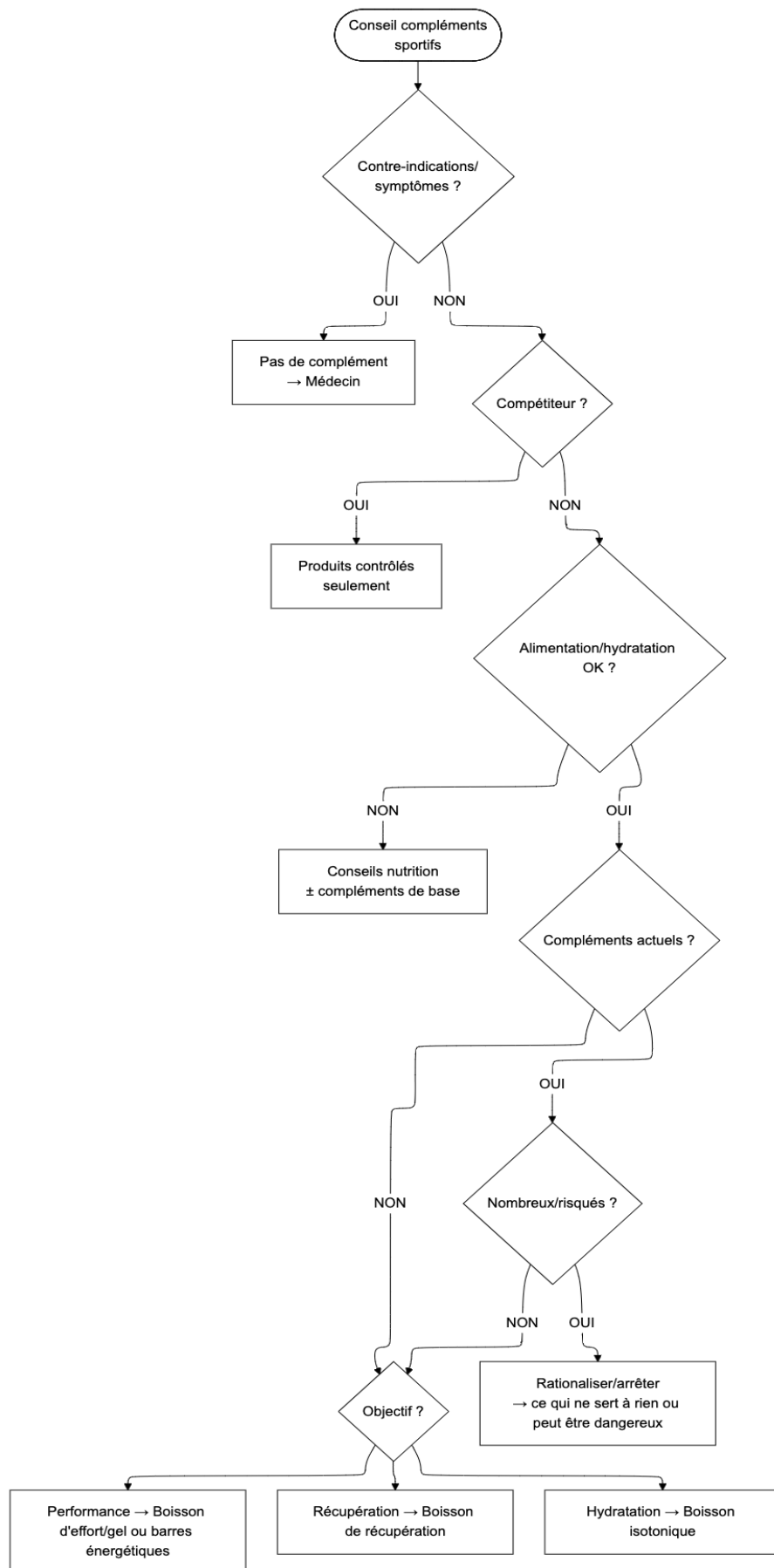
- Attentes principales vis-à-vis de la supplémentation :
- Sources d'information privilégiées (internet, coach, médecin, pairs, etc.) :
- Connaissance des risques liés aux compléments (surconsommation, dopage, interactions) : oui / non
- Précautions prises lors de l'achat (labels, pharmacie, internet, etc.) :

8. Situation particulière

- Femme enceinte ou allaitante :
- Adolescents ou seniors (>60 ans) :

9. Remarques ou questions du sportif

Arbre décisionnel : voir page suivante



Exemples de patients :

Exemple 1 : homme 30 ans, BMI 24, course à pied, 4 entraînements par semaine, durée d'entraînement moyen 1heure, intensité élevée, depuis 8 ans, objectif performance et prévention des blessures, omnivore, 3 repas par jour, consommation de produits animaux 1 fois par jour, 5 portions de fruits légumes, pas d'antécédents médicaux (c'est ce qu'il affirme mais il a l'air un peu ignorant de la santé), pas de traitement, pas d'automédication, tabac 2 cigarettes par jour, 1 bière et 1 verre de vin le samedi soir avec les amis, pas de problèmes de santé sauf crampes parfois et douleurs digestives à l'effort parfois, ne boit pas beaucoup hors entraînement

Boit des solution isotoniques pendant ses entraînements, et des boisson énergétiques, ne connaît rien au produits dopants mais ne pratique pas en compétition.

Analyse du profil du sportif

Paramètre	Analyse du profil
Hydratation	Le faible apport hydrique hors effort est le facteur probable des crampes musculaires.
Digestion	L'usage combiné de boissons isotoniques et énergétiques semble saturer ses capacités digestives, provoquant des troubles à l'effort.
Habitudes	Le tabagisme (2 cigarettes/jour) impacte la récupération et l'oxygénation.
Niveau d'information	Le profil "ignorant de la santé" souligne un besoin crucial d'éducation thérapeutique sur l'équilibre électrolytique et la lecture des étiquettes.

Dialogue au comptoir et intervention du pharmacien

Pharmacien : « Bonjour. Vous m'indiquez ressentir des douleurs digestives et des crampes lors de vos sorties en course à pied. Pourriez-vous me dire ce que vous consommez avant et pendant vos séances ? »

Patient : « En général, je prends une barre énergétique ou ce que j'ai sous la main. Pendant l'effort, je bois des boissons énergétiques et isotoniques du commerce. »

Pharmacien : « Je vois. Ces boissons, associées à une hydratation insuffisante en dehors des entraînements, sont probablement à l'origine de vos troubles digestifs et de vos crampes. Pour votre confort, nous allons réviser votre stratégie nutritionnelle. »

Plan de conseil nutritionnel :

Le pharmacien propose au patient le plan suivant, adapté à ses séances d'une heure :

- Avant l'effort (1h à 2h avant) : Prioriser des glucides simples pour l'énergie.

- *Option A* : 1 banane mûre et 250–400 ml d'eau.
- *Option B* : 1 petite barre énergétique (~100 kcal) ou 1 tartine de pain avec de la confiture.
- Pendant l'effort : Simplifier l'apport pour limiter les troubles digestifs.
 - Pas de solide nécessaire pour une séance d'une heure.
 - Boire 150–300 ml d'eau en tout par petites gorgées toutes les 15–20 min. En cas de forte chaleur, ajouter des électrolytes pour prévenir les crampes.
- Après l'effort : Favoriser la récupération.
 - Objectif : recharger en glucides et protéines.
 - *Exemples* : 1 yaourt avec des fruits et des flocons d'avoine, ou un shaker de récupération.
 - Réhydratation systématique avec de l'eau (ou eau + électrolytes si chaleur).

Conclusion de l'entretien

Le pharmacien insiste sur l'importance de l'hydratation quotidienne hors effort pour une santé durable et l'arrêt du tabac. Il conclut par une mise en garde : « Privilégiez des produits certifiés, disponibles en pharmacie, et méfiez-vous des achats sur internet. Si les troubles persistent malgré ces ajustements, je vous orienterai vers un médecin. »

Exemple 2 :

Exemple 2 : femme 24 ans, BMI 24, tendance à prendre facilement du poids, course à pied, 3 entraînements par semaine, durée d'entraînement moyen 1heure, intensité élevée, depuis 5 ans, objectif performance et récupération, végétarienne, 3 repas par jour, consommation de laitages et œufs 1 fois par jour, 5 portions de fruits légumes, pas d'antécédents médicaux graves mais allergie au pollen traitement antihistaminique, automédication (AINS), pas de tabac, 2 verres d'alcool (cocktails) le samedi soir avec les amis, pas de problèmes de santé sauf allergie, douleurs digestives à l'effort parfois et douleurs menstruelles sévères, boit 1,5 litres d'eau hors entraînement

Boit des solution énergétiques (décathlon) pendant ses entraînements, ne connaît rien au produits dopants mais ne pratique pas en compétition

Analyse du profil de la sportive

Paramètre	Analyse du profil
Digestion	Les douleurs digestives à l'effort couplées à l'usage, même occasionnel, d'AINS, nécessitent de faire spécifier l'usage de l'AINS.
Santé féminine	Les douleurs menstruelles sévères invalidantes nécessitent une investigation médicale spécialisée (gynécologie) pour exclure toute pathologie sous-jacente.
Nutriments	Le régime végétarien demande une vigilance sur la complémentarité des sources protéiques pour optimiser la récupération et assurer l'apport recommandé.
Allergies	L'allergie au pollen justifie une adaptation des horaires d'entraînement pour réduire l'exposition aux allergènes et améliorer le confort respiratoire.

Dialogue au comptoir et intervention du pharmacien

Pharmacien : « Bonjour. Une automédication par AINS. Pourriez-vous me préciser la fréquence et le contexte de cette prise ? »

Patiente : « J'utilise de l'ibuprofène à chacun de mes cycles menstruels. »

Pharmacien : « Avez-vous déjà consulté pour ces douleurs menstruelles. ? »

Patiente : « Non jamais. »

Plan de conseil nutritionnel et stratégique et conseils au comptoir :

Le pharmacien propose au patient le plan suivant, adapté à ses séances :

- Avant l'effort (1h à 2h avant) : Prioriser des glucides simples pour l'énergie.
 - *Option A* : 1 banane mûre et 250–400 ml d'eau.

- *Option B* : 1 petite barre énergétique (~100 kcal) ou 1 tartine de pain avec de la confiture.
- Pendant l'effort : Simplifier l'apport pour limiter les troubles digestifs.
 - Pas de solide nécessaire pour une séance d'une heure.
 - Boire 150–300 ml d'eau en tout par petites gorgées toutes les 15–20 min. En cas de forte chaleur, ajouter des électrolytes pour prévenir les crampes.
- Après l'effort : Favoriser la récupération.
 - Objectif : recharger en glucides et protéines.
 - *Exemples* : 1 yaourt avec des fruits et des flocons d'avoine, ou un shaker de récupération.
 - Réhydratation systématique avec de l'eau (ou eau + électrolytes si chaleur).

Spécificités végétariennes : Pour optimiser le profil en acides aminés, diversifier vos protéines d'origine végétale (ex : légumineuses + céréales).

Gestion environnementale : Planifiez vos séances tôt le matin ou le soir pour limiter l'exposition au pollen et l'impact de votre allergie sur vos performances.

L'arrêt de la boisson énergétique devrait limiter le risque de troubles digestifs liés à l'effort.

Il est également important que vous consultiez un gynécologue pour vos douleurs menstruelles. En attendant le rendez-vous chez le gynécologue, il est essentiel de consulter votre médecin traitant afin de mettre en place une stratégie thérapeutique optimisée pour vos douleurs menstruelles.

Conclusion de l'entretien

« N'oubliez pas qu'une alimentation végétarienne bien pensée permet d'avoir tous les nutriments nécessaires au bon fonctionnement de l'organisme. Il est nécessaire de faire un suivi gynécologique. Il est également possible d'adapter les horaires d'entraînements afin de limiter l'exposition aux allergènes. »

12.3. Annexe 3 : plan nutrition, effort de 1h ou moins

Avant l'effort (1h à 2h avant) :

- 1 banane mûre
- 1 petite barre énergétique (~100 kcal)
- ou 1 tartine de pain + confiture
- 250–400 ml d'eau

Pendant l'effort :

- Pas de solide nécessaire
- Possibilité de boire **150–300 ml d'eau** en tout par petites gorgées toutes les 15–20 min
 - Si forte chaleur : possibilité d'ajouter des électrolytes

Après l'effort :

- Objectif : **recharger en glucides + protéines**
par exemple :
 - 1 yaourt + fruits + flocons d'avoine
 - ou 1 shakeur de récupération
 - et réhydratation avec eau ou eau + électrolytes (si forte chaleur)

12.4. Annexe 4 : plan nutrition, effort entre 1 h et 2 h

Avant l'effort (2h avant) :

- 1 petit repas riche en glucides complexes :
 - Porridge avoine + banane + miel
 - ou tartines pain complet + confiture + 1 yaourt nature
- 500 ml d'eau

Pendant l'effort :

- Apport conseillé : **30–60g de glucides/heure**
- Exemples (par heure) :
 - 1 gel énergétique (20–25g) + 1 demi-barre céréales
 - ou 1 banane + boisson isotonique avec glucides
- Boire **500 –750 ml/h** selon température et intensité

Après l'effort :

- Collation dans les 30 min :
 - Shakeur de récupération (protéines et glucides)
 - ou yaourt à boire + banane + 1 tranche de pain tartinée de miel
- Repas 1–2h après : protéines + féculents + légumes

12.5. Annexe 5 : plan nutrition, effort de plus de 2h

Avant l'effort (3h avant) :

- Petit déjeuner ou repas complet :
 - Pâtes complètes + œuf + banane + 1 toast confiture
 - ou riz + légumes + filet de poulet + compote
- 500–750 ml d'eau dans les 2h avant le départ

Pendant l'effort :

- Apport conseillé : **60–90g de glucides/heure**
 - Mélange solide + liquide + gels
 - Exemples par heure :
 - 1 gel (25g) + 1 barre énergétique (20g) + boisson glucidique
 - ou 1 demi-sandwich pain de mie + miel + 1 banane + boisson énergétique
- Ajouter **électrolytes**
- Eau : **500–1000 ml/h** selon météo

Après l'effort :

- Immédiatement :
 - Shakeur de récupération (protéines + glucides)
 - Eau + électrolytes
- Repas complet dans les 1–2h :
 - Pâtes/riz + légumes + viande maigre ou poisson + fruits
- Collation dans l'après-midi si besoin

12.6. Annexe 6 : guide de nutrition glucidique des différents produits phares des marques les plus populaires dans les sports d'endurance

Marque	Gel	Barre énergétique	Boisson	Certification anti-dopage
226ERS	50 grammes de glucides	25 grammes de glucides	87 grammes de glucides	Cologne List
Decathlon nutrition	30 grammes de glucides	20 grammes de glucides	33 grammes de glucides	AFNOR NF V94-001
Maurten	25 grammes de glucides	40 grammes de glucides	40 grammes de glucides	Informed sport
Overstim-s	26 grammes de glucides	20 grammes de glucides	37 grammes de glucides	AFNOR NF V94-001
Andros sport	21 grammes de glucides	23 grammes de glucides	31 grammes de glucides	/
Baouw	30 grammes de glucides	28 grammes de glucides	38 grammes de glucides	/
Isostar	45 grammes de glucides	29 grammes de glucides	35 grammes de glucides	/
Meltonic	15 grammes de glucides	27 grammes de glucides	31 grammes de glucides	/
Näak	27 grammes de glucides	20 grammes de glucides	55 grammes de glucides	/
Ta energy	33 grammes de glucides	20 grammes de glucides	35 grammes de glucides	/

La quantité de glucides est exprimée par portion

/ : signifie qu'il n'y a pas de produits ou de certifications à l'heure actuelle

Les marques sont classées par ordre alphabétique avec d'abord les marques possédant une certification puis les marques n'en possédant pas

**12.7. Annexe 7 : guide de nutrition des différents produits phares de récupération
des marques les plus populaires dans les sports d'endurance**

Marque	Barre	Boisson/ protéine en poudre	Certification anti-dopage
226ERS	/	1,9 g de glucides 23 g de protéines	Cologne List
Decathlon nutrition	26 g de glucides 20 g de protéines	41 g de glucides 14 g de protéines	AFNOR NF V94-001
Maurten	/	/	Informed sport
Overstim-s	15 à 20 g de glucides 10 g de protéines	0,5 g de glucides 29 g de protéines	AFNOR NF V94-001
Andros sport	18 g de glucides 20 g de protéines	/	/
Baouw	18 g de glucides 12 g de protéines	/	/
Isostar	18 g de glucides 19 g de protéines	35 g de glucides 10 g de protéines	/
Meltonic	15 g de glucides 2,9 g de protéines	0,15 g de glucides 25 g de protéines	/
Näak	/	1,7 g de glucides 24 g de protéines	/
Ta energy	/	38 g de glucides 16 g de protéines	/

Légende : Les quantités sont exprimées par portion

/ : signifie qu'il n'y a pas de produits ou de certifications à l'heure actuelle

Les marques sont classées par ordre alphabétique avec d'abord les marques possédant une certification puis les marques n'en possédant pas

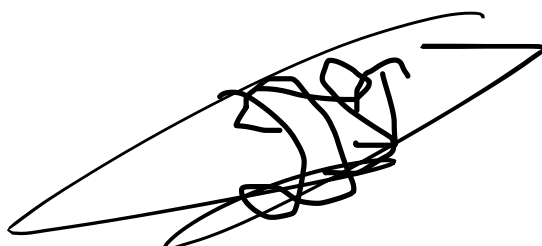
ENGAGEMENT DE NON PLAGIAT

Je, soussigné (e) Mr DOS SANTOS PINTO Hugo

Déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. (Décret n°92-657 du 13 juillet 1992)

En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Signature :



SIGNATURES DU DIRECTEUR DE THESE ET DU DOYEN

N° Étudiant : 21903177

N° Thèse : 32

Nom et Prénom : DOS SANTOS PINTO Hugo

Sujet : Effet des compléments alimentaires disponibles en officine sur la résistance à la fatigue et la récupération physique après des épreuves sportives d'endurance

Tours, le : 29 mai 2026

Le(s) Directeur(s) de Thèse :
Nom(s) et signature(s)

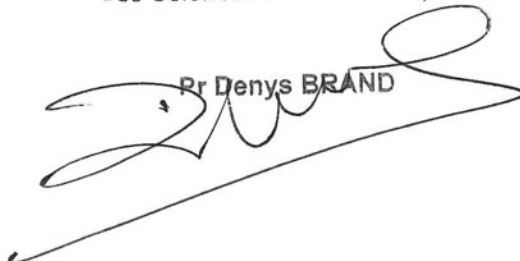
Pierre BESSON



Vu et Transmis :
Le Doyen

Le directeur de la Faculté
des Sciences Pharmaceutiques

Pr Denys BRAND



NOM, PRÉNOM de l'étudiant : DOS SANTOS PINTO HUGO	N° 32
TITRE DE LA THÈSE Effet des compléments alimentaires disponibles en officine sur la résistance à la fatigue et la récupération physique après des épreuves sportive d'endurance	
RÉSUMÉ DE LA THÈSE La thèse analyse l'usage des compléments alimentaires chez les sportifs d'endurance, en lien avec la prévention de la fatigue, l'optimisation de la performance et l'amélioration de la récupération. Elle commence par définir précisément les compléments alimentaires, leur cadre réglementaire, leurs différences avec les médicaments et le système des allégations nutritionnelles et de santé. Elle décrit ensuite les exigences physiologiques des sports d'endurance, les mécanismes de la fatigue et le rôle des principaux nutriments et compléments (glucides, protéines, BCAA, glutamine, électrolytes, fer, vitamines B, antioxydants), en soulignant à chaque fois le niveau de preuve scientifique et les limites de leur efficacité. Une partie importante est consacrée aux risques de dopage involontaire liés à certains compléments, aux conséquences disciplinaires, médicales et sociales pour les athlètes, et aux moyens de prévention. Enfin, la thèse met en avant le rôle central du pharmacien d'officine : évaluation personnalisée du sportif, prévention des risques (dopage, surconsommation, iatrogénie), conseil nutritionnel structuré avant/pendant/après l'effort, coordination avec les autres professionnels de santé et utilisation d'outils pratiques (questionnaire, plans nutritionnels, guides produits).	
MOTS-CLÉS SIGNIFICATIFS DE SON CONTENU, ATTRIBUÉS PAR LE CANDIDAT EN LIAISON AVEC LA BIBLIOTHÈQUE UNIVERSITAIRE ET LES MEMBRES DU JURY Sports d'endurance, compléments alimentaires, fatigue et récupération, dopage involontaire, conseil pharmaceutique, accompagnement personnalisé	
<u>JURY</u> PRÉSIDENT : Madame DEBIERRE-GROCKIEGO Françoise, Maître de Conférences-HDR, Faculté de Pharmacie de Tours MEMBRES : Monsieur BESSON Pierre, Maître de Conférences, Faculté de Pharmacie de Tours Monsieur THIEFFRY Arthur, Pharmacien d'officine (Larçay, pharmacie Totum) Monsieur AZOUGAGH Omar, Pharmacien d'officine (Montlouis sur Loire, pharmacie des Bredins)	
DATE ET LIEU DE SOUTENANCE : Vendredi 29 mai 2026, Faculté de Pharmacie Philippe-Maupas à Tours	