



Université de Strasbourg
FACULTÉ DE PHARMACIE

N° d'ordre : _____

MÉMOIRE DE DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

—

**ROLES ET ENJEUX DE LA NUTRITION CHEZ LE SPORTIF AU
COURS DE LA PREPARATION D'UNE COMPETITION SPORTIVE :
CAS DU MARATHON**

Présenté par Valentine LEFEBVRE

Soutenu le 4 octobre 2024 devant le jury constitué de

Professeur BOUCHER Philippe, Président et Directeur de thèse

Maître de conférences CHATAIGNEAU Thierry, Membre du jury

Mme SCHWEBEL Anaïs, Pharmacien, Membre du jury

Approuvé par le Doyen et
par le Président de l'Université de Strasbourg



Université de Strasbourg
FACULTÉ DE PHARMACIE

N° d'ordre : _____

MÉMOIRE DE DIPLOME D'ÉTAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

—

**ROLES ET ENJEUX DE LA NUTRITION CHEZ LE SPORTIF AU
COURS DE LA PREPARATION D'UNE COMPETITION SPORTIVE :
CAS DU MARATHON**

Présenté par Valentine LEFEBVRE

Soutenu le 4 octobre 2024 devant le jury constitué de

Professeur BOUCHER Philippe, Président et Directeur de thèse

Maître de conférences CHATAIGNEAU Thierry, Membre du jury

Mme SCHWEBEL Anaïs, Pharmacien, Membre du jury

Approuvé par le Doyen et
par le Président de l'Université de Strasbourg



Doyen	Esther KELLENBERGER
Directeurs adjoints	Julien GODET Béatrice HEURTAULT Emilie SICK
Directeur adjoint étudiant	Léo FERREIRA-MOURIAUX

LISTE DU PERSONNEL ENSEIGNANT

Professeurs :

Philippe	BOUCHER	Physiologie
Nathalie	BOULANGER	Parasitologie
Line	BOUREL	Chimie thérapeutique
Pascal	DIDIER	Biophotonique
Saïd	ENNAHAR	Chimie analytique
Valérie	GEOFFROY	Microbiologie
Philippe	GEORGEL	Bactériologie, Virologie
Jean-Pierre	GIES	Pharmacologie moléculaire
Béatrice	HEURTAULT	Pharmacie galénique
Esther	KELLENBERGER	Bio-Informatique
Maxime	LEHMANN	Biologie cellulaire
Eric	MARCHIONI	Chimie analytique
Francis	MEGERLIN	Droit et économie pharm.
Yves	MELY	Physique et Biophysique
Jean-Yves	PABST	Droit Economie pharm.
Françoise	PONS	Toxicologie
Valérie	SCHINI-KERTH	Pharmacologie
Florence	TOTI	Pharmacologie
Thierry	VANDAMME	Biogalénique
Catherine	VONTHRON	Pharmacognosie
Pascal	WEHRLÉ	Pharmacie galénique

Professeurs-praticiens hospitaliers

Julien	GODET	Biostatistiques - science des données
Jean-Marc	LESSINGER	Biochimie
Bruno	MICHEL	Pharm. clinique santé publique
Pauline	SOULAS-SPRAUEL	Immunologie
Geneviève	UBEAUD-SÉQUIER	Pharmacocinétique

Enseignants contractuels

Alexandra	CHAMPERT	Pharmacie d'officine
Matthieu	FOHRER	Pharmacie d'officine
Philippe	GALAIS	Droit et économie pharm.
Philippe	NANDE	Ingénierie pharmaceutique
Caroline	WILLER - WEHRLÉ	Pharmacie d'officine

Maîtres de Conférences :

Nicolas	ANTON	Pharmacie biogalénique
Fareeha	BATOOL	Biochimie
Martine	BERGAENTZLÉ	Chimie analytique
Elisa	BOMBARDA	Biophysique
Aurélié	BOURDERIOUX	Pharmacochimie
Emmanuel	BOUTANT	Virologie et Microbiologie
Véronique	BRUBAN	Physiologie et physiopath.
Anne	CASSET	Toxicologie
Thierry	CHATAIGNEAU	Pharmacologie
Manuela	CHIPER	Pharmacie biogalénique
Guillaume	CONZATTI	Pharmacie galénique
Marcella	DE GIORGI	Pharmacochimie
Serge	DUMONT	Biologie cellulaire
Gisèle	HAAN-ARCHIPOFF	Plantes médicinales
Célien	JACQUEMARD	Chémoinformatique
Julie	KARPENKO	Pharmacochimie
Sonia	LORDEL	Chimie analytique
Clarisse	MAEHLING	Chimie physique
Rachel	MATZ-WESTPHAL	Pharmacologie
Cherifa	MEHADJI	Chimie
Nathalie	NIEDERHOFFER	Pharmacologie
Sergio	ORTIZ AGUIRRE	Pharmacognosie
Sylvie	PERROTEY	Parasitologie
Romain	PERTSCHI	Chimie en flux
Frédéric	PRZYBILLA	Biostatistiques
Patrice	RASSAM	Microbiologie
Eléonore	REAL	Biochimie
Andreas	REISCH	Biophysique
Ludivine	RIFFAULT-VALOIS	Analyse du médicament
Carole	RONZANI	Toxicologie
Emilie	SICK	Pharmacologie
Yaouba	SOUAIBOU	Pharmacognosie
Maria-Vittoria	SPANEDDA	Chimie thérapeutique
Jérôme	TERRAND	Physiopathologie
Nassera	TOUNSI	Chimie physique
Aurélié	URBAIN	Pharmacognosie
Bruno	VAN OVERLOOP	Physiologie
Maria	ZENIOU	Chimiogénomique

Maîtres de conférences - praticiens hospitaliers

Julie	BRUNET	Parasitologie
Nelly	ÉTIENNE-SELLOUM	Pharmacologie- pharm. clinique

Assistant hospitalier universitaire

Damien	REITA	Biochimie
--------	-------	-----------

SERMENT DE GALIEN

JE JURE,

en présence des Maîtres de la Faculté,
des Conseillers de l'Ordre des Pharmaciens
et de mes condisciples :

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

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

De ne dévoiler à personne les secrets
qui m'auront été confiés et dont j'aurai eu
connaissance dans la pratique de mon art.

Si j'observe scrupuleusement ce serment,
que je sois moi-même honoré
et estimé de mes confrères
et de mes patients.

REMERCIEMENTS

A Monsieur le Professeur Philippe BOUCHER,

Pour l'honneur que vous me faites de diriger cette thèse.

Merci pour vos enseignements captivants, interactifs et concrets au cours de mon cursus universitaire.

Merci également pour votre réactivité et vos conseils au cours de la rédaction de cette thèse.

A Monsieur Thierry CHATAIGNEAU,

Pour l'honneur que vous me faites de participer à mon jury de thèse.

Merci pour les connaissances que vous m'avez transmises pendant mes études, votre gentillesse et votre disponibilité.

A Madame Anaïs SCHWEBEL,

Pour avoir accepté de faire partie de mon jury en ce jour si important pour moi. Merci de m'avoir fait confiance et de m'avoir guidé dès le début de ma vie professionnelle. Je te remercie de m'avoir permis d'évoluer dans une profession que j'aime tant.

A mes **parents**, merci de m’ avoir appris de belles valeurs humaines, telles que le partage, la gentillesse et la bienveillance. Vous avez toujours été là pour moi ; vous avez partagé mes joies et m’ avez soutenu dans les épreuves. Je vous remercie du plus profond du cœur de tout ce que vous avez fait pour moi.

A **Herrade**, ma sœur chérie, merci pour ton soutien infaillible, ton franc parler, ton humour espiègle et ta bonne humeur communicative.

A **Mathieu**, merci pour ta présence lumineuse, ton humour ravageur, ta patience et ton soutien sans faille. Merci pour tes conseils avisés et ta précieuse relecture pendant la rédaction de cette thèse. Tu crois en moi à chaque instant ; tu es mon compagnon de route en qui j’ ai une totale confiance.

A mes **grands-parents**, merci pour tout ce que vous m’ avez apporté, que ce soient les petits plats nourrissants, mais encore les conseils sages et avisés, en passant par une dose infinie d’ amour.

A **Sophie** et **Marine**, merci d’ être des amies en or, toujours présentes, de bon conseil et d’ encore meilleures intentions. Vous avez partagé mes succès, mais vous m’ avez surtout épaulé dans mes échecs. Merci pour toutes ces soirées strasbourgeoises, ces repas si joyeux et tous ces beaux moments de partage.

A **Charlotte**, mon amie si chère depuis cette rentrée à la faculté de médecine. Merci pour ta douceur, ta gentillesse et ton aura lumineuse. On aura vécu de magnifiques moments, que ce soit à la Faculté de Pharmacie ou rue Sainte Madeleine, aussi bien que des épreuves qui forgent, sans jamais cesser de compter l’ une sur l’ autre.

A **Zoé**, mon amie d’ enfance, merci d’ être cette personne attentionnée, passionnée et animée par la vie. Ton énergie et ta motivation m’ ont tant inspiré depuis ce fameux jour où nous nous sommes rencontrés dans la cour de récréation de la maternelle.

A **Agathe**, merci d’ être une amie si fidèle. Que ce soit au lycée Jeanne D’ Arc ou au Foyer Jean Sturm, nous avons révisé ensemble des heures durant, autour de goûters d’ anthologie. Merci d’ être cette acolyte avec qui je peux partager pleins de moments de vie, qu’ ils soient sportifs ou gourmands.

A mes amies de la Faculté de Pharmacie, **Chloé**, **Camille** et **Sarah**, merci pour toutes ces années remplies de joies, de fous rires, de discussions passionnées et de projets en tout genre.

A la **bande de copains**, Lauriane, Juliette, Gabriel, Loïc, Guillaume, Alexis, Edgard, Vincent et Hugo, merci pour tous les moments partagés en Alsace, dans les Alpes ou en Provence, autour d’ une belle tablée ou sur des sentiers ensoleillés.

A toute ma **famille**, merci pour vos encouragements, votre soutien inconditionnel et votre amour. Les retrouvailles sont toujours mémorables et ce malgré la distance, quelle chance !

A toute l'équipe de la Pharmacie du Nordfeld, merci pour votre gentillesse, votre aide et vos conseils. C'est un plaisir de venir travailler tous les jours dans une ambiance chaleureuse et bienveillante.

A **Françoise Noir**, merci pour le temps que vous avez consacré à la correction de cette thèse. Merci pour votre investissement et votre gentillesse si importante pour moi.

A tous ceux que je n'ai pas nommé, mais qui m'ont soutenu durant ces belles années d'études, merci tout simplement d'être présent en ce jour important pour moi.

MERCI

Table des matières

Liste des abréviations.....	10
Liste des figures	12
Liste des annexes	14
Introduction.....	15
1 Le marathon : une préparation et une nutrition spécifique.....	15
1.1 Une pratique sportive démocratisée.....	15
1.1.1 Histoire du marathon.....	15
1.1.2 Une discipline populaire	18
1.1.3 Valeurs physiologiques	21
1.1.4 Le programme d'entraînement.....	25
1.2 La balance énergétique du sportif	28
1.2.1 La dépense énergétique globale	29
1.2.2 La dépense énergétique du marathon.....	29
1.2.3 La prise alimentaire : une régulation fine	32
1.3 Les principales sources d'énergie du sportif.....	35
1.3.1 Les glucides.....	35
1.3.2 Les lipides	39
1.3.3 Les protéines	45
2 Amélioration des performances par la nutrition.....	49
2.1 Utilisation des substrats endogènes : voies métaboliques impliquées	49
2.1.1 La glycolyse	49
2.1.2 Glycolyse anaérobie.....	55
2.1.3 Oxydation des acides gras.....	58
2.1.4 Oxydation des protéines.....	62
2.2 S'alimenter en fonction des besoins de l'organisme du sportif	65
2.2.1 Avant l'effort.....	65
2.2.2 Pendant l'effort	74
2.2.3 En récupération	78
2.3 L'hydratation.....	81
2.3.1 Rôle de l'hydratation.....	81
2.3.2 Une hydratation réussie.....	84
3 Micronutrition : quelle place lui donner dans l'alimentation du sportif ?.....	90
3.1 Définitions générales.....	90

3.1.1	Vitamines	90
3.1.2	Minéraux	96
3.1.3	Oligoéléments	99
3.2	Sportif : supplémentation nécessaire ?.....	101
3.2.1	Les compléments alimentaires : une obligation ?	101
3.2.2	Correction des déficits	104
4	Limites et dérives de la nutrition chez le marathonien.....	109
4.1	Impacts de régimes spécifiques chez le sportif.....	109
4.1.1	Restriction alimentaire	109
4.1.2	Régime cétogène	111
4.1.3	Régime dissocié scandinave.....	115
4.2	L'emploi de compléments alimentaires non justifié : un danger	117
4.2.1	Règlementation des compléments alimentaires	117
4.2.2	Les compléments alimentaires néfastes pour la santé.....	121
	Conclusion	123
	Références bibliographiques	131

Liste des abréviations

AA : Acide Aminé

ADP : Adénosine Di-Phosphate

AET : Apport Energétique Total

AG : Acide Gras

AGL : Acides Gras Libres

AGMI : Acides Gras Monoinsaturés

AGPI : Acides Gras Poly-Insaturés

AGS : Acides Gras Saturés

AIS : Institut Australien du Sport

ALA : Acide arachidonique

AMA : Agence Mondiale Antidopage

AMM : Autorisation de Mise sur le Marché

ANC : Apports Nutritionnels Conseillés

ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation de l'Environnement et du travail

ATP : Adénosine Tri-Phosphate

BCAA : Acides Aminés Essentiels Branchés

CAT : Carnitine Acylcarnitine Translocase

CIO : Comité International Olympique

CPT : Carnitine Palmitoyl Transferase

CRF : Corticotrophin Releasing Factor

DGCCRF : Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes

DHA : Acide Docosahexaénoïque

EPA : Acide Eicosapentaénoïque

HIT : High Intensity Training

IAAF : International Athletics Amateur Federation

IG : Index Glycémique

INSERM : Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

JO : Jeux Olympiques

LIT : Low Intensity Training

MCH : Melanin Concentrating Hormon

MCT : Monocarboxylate Transporter

MET : Metabolic Equivalent Task

MG : Matière Grasse

MIT : Moderate Intensity Training

PMA : Puissance Maximale Aérobie

RDS : Régime Dissocié Scandinave

SA : Seuil Aérobie

SAN : Seuil Anaérobie

SNC : Système Nerveux Central

TAG : Triacylglycérol

UIPAC : l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée

VMA : Vitesse Maximale Aérobie

VO₂ max : Volume d'Oxygène Maximal

VS : Vitesse Spécifique

Liste des figures

Figure 1 : Nombre de participants à une course en compétition en fonction de la distance [3]	19
Figure 2 : Évolution du temps de course en fonction du sexe des coureurs [3].....	19
Figure 3 : Répartition au fil des années des coureurs en fonction de la catégorie d'âge [3]	20
Figure 4 : Énergie fournie par les processus d'aérobie et d'anaérobie pendant un exercice [4]	22
Figure 5 : Valeurs prédictives indicatives du VO ₂ max en mL.min ⁻¹ .kg ⁻¹ [4]	23
Figure 6 : Pourcentage de la VMA maintenue sur différentes distances en compétition [6]	25
Figure 7 : Schéma du mécanisme de surcompensation pendant un plan d'entraînement [4]	26
Figure 8 : Évolution comparative de la courbe de consommation d'oxygène chez un même sujet entre deux périodes d'entraînement	26
Figure 9 : Panel de types d'exercices en fonction de la durée, du pourcentage de VMA, de la récupération et du développement cible [6]	27
Figure 10 : Zones d'intensité d'entraînement possibles : de la moins intense (Zone 1) à la plus intense (Zone 7) [8]	28
Figure 11: Tableau indicatif du nombre de MET en fonction de l'activité physique.....	30
Figure 12: Les voies de régulation hypothalamique de la prise alimentaire [14]	33
Figure 13 : Leptinémie mesurée au repos chez des sujets sédentaires, marathoniens avant et après course (A), ainsi que le débit de production de leptine par le tissu adipeux blanc (B) [7]	34
Figure 14 : Schémas de la glycogénogénèse et de la glycogénolyse	36
Figure 15 : Exemples d'indice glycémique de certains aliments [28]	39
Figure 16 : Structure chimique et nomenclature de quelques acides gras naturels courants [18]	40
Figure 17 : Exemples d'aliments riches en acides gras saturés [27].....	41
Figure 18 : Exemples d'aliments riche en acide α-linolénique [27]	42
Figure 19 : Exemples d'aliments riche en acide linoléique [27].....	43
Figure 20 : Ratio Omega 6/Oméga 3 dans différentes populations [21]	43
Figure 21 : Structure chimique d'un TAG [18]	43
Figure 22 : Schéma de la structure chimique d'un acide aminé [24].....	45
Figure 23 : Classification des acides aminés essentiels et non essentiels	45
Figure 24 : Mesure de la biodisponibilité d'une protéine grâce à sa digestibilité [25].....	46
Figure 25 : Tableau de valeur de l'indice chimique en fonction des protéines [26].....	47
Figure 26 : Exemples d'aliments riches en protéines [27].....	48
Figure 27 : Origine des apports énergétiques en fonction de la durée d'un effort en endurance [29]...	49
Figure 28 : Devenir des glucides alimentaires [30]	50
Figure 29 : Représentation de la glycolyse aérobie [31].....	52
Figure 30 : Représentation du cycle de Krebs [32].....	53
Figure 31 : Représentation de la phosphorylation oxydative dans la membrane interne mitochondriale [33].....	54
Figure 32 : Schéma de la réaction chimique de transformation du pyruvate en lactate [34].....	56
Figure 33 : Diagramme de prédominance de l'acide lactique	57
Figure 34 : Schéma du passage transmembranaire des Acides gras à longue chaîne carbonée [38].....	59
Figure 35 : Schéma de l'hélice de Lynen [38]	60
Figure 36 : Utilisation des glucides et des lipides (en %) en fonction de l'intensité de l'exercice [40]	61
Figure 37 : Devenir des protéines alimentaires.....	63

Figure 38 : Schéma de la production d'urée en fonction de la disponibilité en glucides de l'organisme	64
Figure 39 : Tableau du temps de séjour gastrique de différents aliments.....	69
Figure 40: Tableau des propriétés des différentes eaux	86
Figure 41 : Tableau du plan d'hydratation optimal d'un adulte [47]	88
Figure 42 : Rôle des compléments alimentaire dans la stratégie globale de l'athlète [51].....	103
Figure 43 : Système de classification des compléments alimentaires de l' AIS [51]	104
Figure 44 : Conséquences possibles d'un régime hypocalorique [45].....	111
Figure 45 : Catégorisation des substances interdites par l'AMA [45].....	123

Liste des annexes

Annexe 1 : Exemples de petit déjeuner lors de la préparation à un marathon [62]	125
Annexe 2 : Exemples de menus quotidiens [62].....	128

Introduction

La course à pied, aussi appelée course de fond est une discipline sportive d'endurance qui s'est fortement démocratisée au fil des années. Le nombre de pratiquants ne cesse d'augmenter et cela pour différentes raisons ; facilité d'accès, moyen de sociabilisation reconnu et organisation de nombreuses compétitions à travers le monde. Le marathon, course de fond très réputée, est représentée aux Jeux Olympiques grâce à l'impulsion de Michel Bréal et de Pierre de Coubertin, à l'occasion des Jeux d'Athènes de 1896. Depuis cette date, la discipline a vu passer de nombreux athlètes et détenteurs de records.

Que ce soit en tant que sportif amateur ou en tant qu'athlète professionnel, le marathon est vécu comme une épreuve exigeante pour le corps humain. En effet, il demande d'avoir de bonnes capacités cardio-vasculaires, un entraînement rigoureux, une hydratation optimale et surtout une nutrition adaptée à l'effort. Afin d'améliorer son temps de course sur un marathon, le sportif peut donc axer sa préparation sur différents points. Lors de celle-ci, il existe plusieurs piliers pour améliorer le chronomètre. Parmi ces piliers, la nutrition joue-t-elle un rôle fondamental ?

La nutrition du sportif est un domaine de plus en plus étudié, que ce soit par des scientifiques, par des journalistes ou par les athlètes eux-mêmes. Ainsi il existe de nombreux articles, revues et études publiés dans des revues scientifiques ou dans la presse. Cependant il est important de garder un regard objectif et de comparer les différentes sources d'informations. Quelles sont donc les principales recommandations nutritionnelles à respecter lors de la préparation à un marathon ? Existe-t-il un régime miracle permettant d'améliorer son temps de course ? La nutrition du sportif représente-t-elle également un danger pour l'organisme ? En quoi l'alimentation du sportif est-elle un facteur clé dans la préparation d'un marathon ?

1 Le marathon : une préparation et une nutrition spécifique

1.1 Une pratique sportive démocratisée

1.1.1 Histoire du marathon

L'origine de cette course mythique remonte à la Grèce Antique, au Vème siècle avant J-C. Lors de la Première Guerre Médique, au terme de la bataille de Marathon, une cité située sur la côte grecque, le messager Phillipidès aurait été envoyé à Athènes afin d'annoncer la victoire des Athéniens face aux

Perses. Il aurait parcouru en courant la distance séparant les deux villes, soit 40 kilomètres et serait mort d'épuisement juste après avoir délivré le message de la victoire à Athènes.

Des siècles plus tard, le premier Congrès Olympique est organisé en juin 1894 à Paris par l'Union des Sociétés Françaises de Sports Athlétiques à l'initiative de Pierre de Coubertin, historien et pédagogue français. Le Congrès Olympique décide de rééditer les Jeux Olympiques (JO) en 1896 à Athènes et crée pour ce faire le Comité International Olympique (CIO). Pour l'organisation de ces JO seuls des hommes amateurs peuvent y participer ; il s'agit de promouvoir le sport à l'international, cette compétition n'est donc pas ouverte aux sportifs professionnels. Plusieurs sports sont choisis tels que le tir, la course à pied, la natation et le cyclisme ; mais c'est le linguiste français Michel Bréal qui suggère à Pierre de Coubertin d'introduire l'épreuve sportive du marathon, une course à pied de 40 kilomètres entre Marathon et Athènes.

Celle-ci a lieu le 10 avril 1896 et est remportée par un berger grec du nom de Spyridon Louis en 2 heures et 58 minutes, ovationné par la foule venue en masse pour cette épreuve inédite. Les marathons olympiques suivants ont lieu à Paris en 1900, à Saint-Louis en 1904 et à Londres en 1908. La distance de ce dernier est modifiée sur une décision d'Edouard VII. En effet, il souhaite que la course démarre dans les jardins du château de Windsor et s'achève au pied de la loge royale au White City Stadium. Ce changement de parcours aboutit à une distance de 26 miles et 385 yards, soit 42,195 kilomètres. Cette distance variera encore au fil des olympiades et finira par être fixée à 42,195 kilomètres lors des JO de Paris en 1924.

Depuis les premiers JO de 1896 le marathon s'est largement développé ; de nombreuses compétitions voient le jour dans différentes villes et plusieurs athlètes se démarquent et passent au statut de sportif professionnel.

L'épreuve du marathon a vu éclore de nombreux talents suite aux Jeux olympiques de 1896 et à la victoire de Spyridon Louis. Michel Théato et Johny Hayes se succèdent sur le podium et avec eux une petite dizaine de coureurs passeront sur le circuit professionnel. Les marathons existants se courent sur des pistes d'athlétisme, par exemple une piste de 160 mètres à courir 260 fois pour achever les 42,195 kilomètres. À partir de 1908, de nombreuses épreuves pour amateurs et professionnels se développent aux États Unis et notamment à New York, où sont organisés en l'espace de quatre mois, quatre marathons professionnels et sept marathons amateurs. Parmi les athlètes professionnels, on peut citer l'italien Dorando Pietri et l'Américain Thomas Longboat qui s'affronteront régulièrement au cours de leurs carrières.

Le marathon connaîtra ses champions olympiques et ses déceptions, mais le nom à retenir reste celui d'Emil Zatopek, athlète tchécoslovaque aux méthodes d'entraînements innovatrices. Il s'entraîne sous forme de séances de fractionnés. Les distances de prédilection d'Emil Zatopek sont le 5000 mètres et le 10 000 mètres, distance sur laquelle il est invaincu entre 1948 et 1952 aux JO et aux Championnats d'Europe. Il n'a jamais couru de marathon et pourtant il l'annonce ; il participera au marathon des JO d'Helsinki en juillet 1952 qu'il compte courir en moins de 2 heures et 15 minutes, alors que le record du monde est de 2 heures 20 minutes et 42 secondes. Le 20 juillet 1952, il gagne le 10 000 mètres en 29 minutes et 17 secondes. Quatre jours plus tard, il remporte sur le 5000 mètres en 14 minutes et 6 secondes. Le 27 juillet 1952, il s'impose au marathon des JO en 2 heures et 23 minutes, record olympique, et réalise un triplé légendaire et unique en remportant les trois épreuves phares de l'athlétisme.

Emil Zatopek continue de s'entraîner et de participer aux diverses compétitions, et c'est en 1956 aux JO de Melbourne qu'il affronte son ami français Alain Mimoun : c'est finalement ce dernier qui s'impose en 2 heures et 25 minutes. Alain Mimoun est le dernier champion olympique tricolore sur l'épreuve du marathon olympique ; il sera nommé chevalier de la Légion d'honneur par le général de Gaulle.

Le marathon de nos jours est réputé pour être un sport dans lequel les africains dominent : il faut mentionner le premier grand marathonien d'Afrique Noire, l'éthiopien Abebe Bikila. Convoqué comme athlète remplaçant, la fédération éthiopienne d'athlétisme l'invite aux JO de Rome de 1960. Soldat de la garde impériale et coureur de fond, il prend le départ du marathon pieds nus. Il va s'imposer au sprint face au favori marocain Rhadi Ben Abdesselam en 2 heures et 15 minutes : il bat le record du champion olympique Emil Zatopek de 8 minutes. Abebe Bikila réitère sa performance aux JO de Tokyo de 1964, où il court, cette fois-ci avec des chaussures en 2 heures et 12 minutes. Victime d'un accident de la route en 1969, il devient paraplégique et s'essaiera au tir à l'arc en compétition. Il décède quatre ans plus tard des suites d'un accident vasculaire cérébral.

Jusqu'en 1984, seuls les hommes sont autorisés à participer à l'épreuve de course à pied du marathon. Cette règle n'empêchera pas de nombreuses femmes de courir non officiellement. En 1896, le lendemain de la course officielle des JO d'Athènes, la coureuse grecque Stamata Revithi parcourt seule la distance Marathon-Athènes en 5 heures et 30 minutes. En 1967, lors du marathon de Boston, la coureuse américaine Katherine Switzer est la première femme à prendre le départ d'un marathon ; elle sera exclue de la fédération d'athlétisme. Finalement, le premier marathon féminin est organisé aux championnats du monde d'Helsinki en 1983 ; il est remporté par la Norvégienne Grete Waitz en 2 heures

et 22 minutes. L'année suivante l'Américaine Joan Benoit entre dans l'histoire en devenant la première championne olympique à Boston.

Depuis les années 2000, un athlète survole la discipline ; il s'agit de l'éthiopien Eliud Kipchoge. Agé de 38 ans, il a commencé par du cross-country, avant de pratiquer la course sur piste et notamment du 5000 mètres, pour finir par courir le marathon après une non-qualification aux JO de Londres. Vainqueur de 14 marathons sur 16 auxquels il a participé et double champion olympique de la distance (aux JO de Rio 2016 et de Tokyo 2021), il est notamment célèbre pour être passé sous la barre des deux heures à Vienne, lors d'une tentative de record dans le cadre du projet « Ineos 1 :59 Challenge ». Cette performance réalisée en 1 heure 59 minutes et 40 secondes n'est pas homologuée par l'International Athletics Amateur Federation (IAAF). Il était détenteur du record du monde de la distance en 2 heures 2 minutes et 9 secondes, lors du marathon de Berlin 2022. Cependant l'athlète kényan Kelvin Kiptum détrône Eliud Kipchoge lors du marathon de Chicago 2023 et prend le record du monde en 2 heures et 35 secondes. Kelvin Kiptum décède en février 2024 à l'âge de 24 ans dans un accident de voiture. Le record du monde féminin du marathon est détenu par l'éthiopienne Tigist Assefa depuis le marathon de Berlin en septembre 2023, qu'elle a couru en 2 heures 11 minutes et 53 secondes.

La course à pied de longue distance existe depuis bien longtemps : elle a évolué d'une fonction utilitaire à une activité sportive pratiquée par des dizaines de milliers de personnes, que ce soit en compétition ou en loisir [1].

1.1.2 Une discipline populaire

La définition du marathon, d'après le dictionnaire Larousse est « *une course à pied de grand fond, sur une distance de 42,19 5 kilomètres, qui est une discipline olympique* » [2]. La course de fond ou course d'endurance est une épreuve d'athlétisme, consistant à courir une distance d'au moins 5 kilomètres sur piste, sur route ou sur un terrain naturel. Cette discipline est pratiquée pour le plaisir ou en compétition, que ce soit au niveau amateur ou professionnel. La compétition se fait sur des courtes distances, tels que le 5 km ou le 10 km, des distances moyennes comme le semi-marathon (21km), mais aussi sur des distances plus longues allant du marathon (42,195km) à l'ultrafond : 80 km à 180 km.

À l'échelle mondiale, la course à pied est pratiquée par plus de **621 millions** de personnes. Plus spécifiquement, le nombre de participants à une course en 2016 était de **9,1 millions**, tandis que le nombre de participants à un marathon en 2018 était de **1,8 million** de personnes. En 2018, **50,24%** des coureurs étaient des femmes [3]. L'engouement pour les courses varie en fonction de la distance : les

courses de 5 km et les semi-marathons sont plus populaires et comptent plus de participants que les courses de 10 kilomètres et les marathons (Figures 1 et 2).

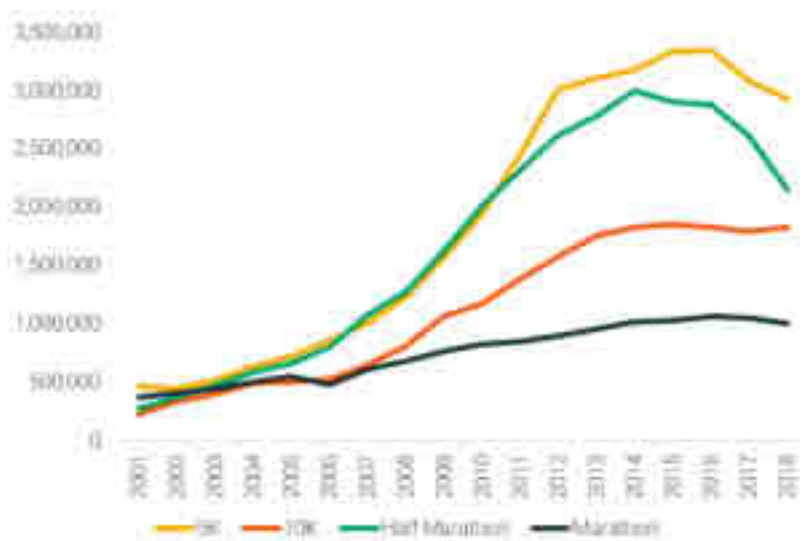


Figure 1 : Nombre de participants à une course en compétition en fonction de la distance [3]

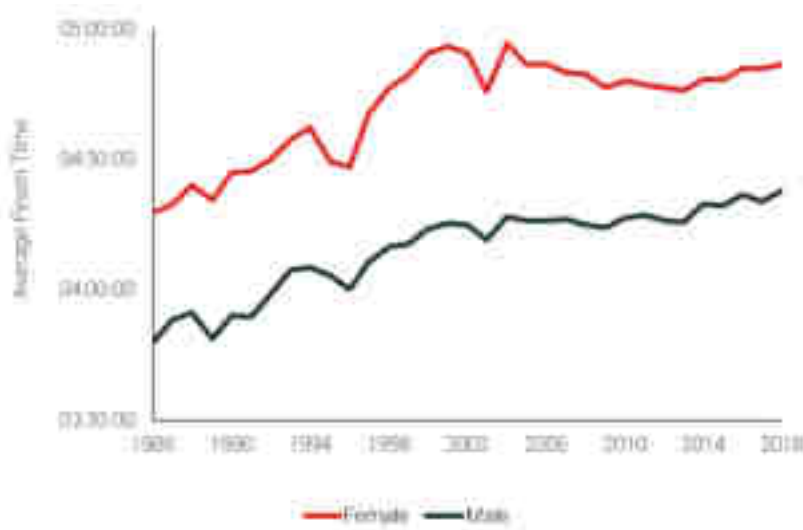


Figure 2 : Évolution du temps de course en fonction du sexe des coureurs [3]

Le temps moyen d'un marathon est passé de 3 heures 52 minutes en 1986 à 4 heures 28 minutes en 2001, ce qui montre une augmentation du nombre de coureurs amateurs. Le pays comptant le plus de coureurs est les Etats Unis, mais également les plus lents, tandis que l'Espagne est le pays des plus rapides.

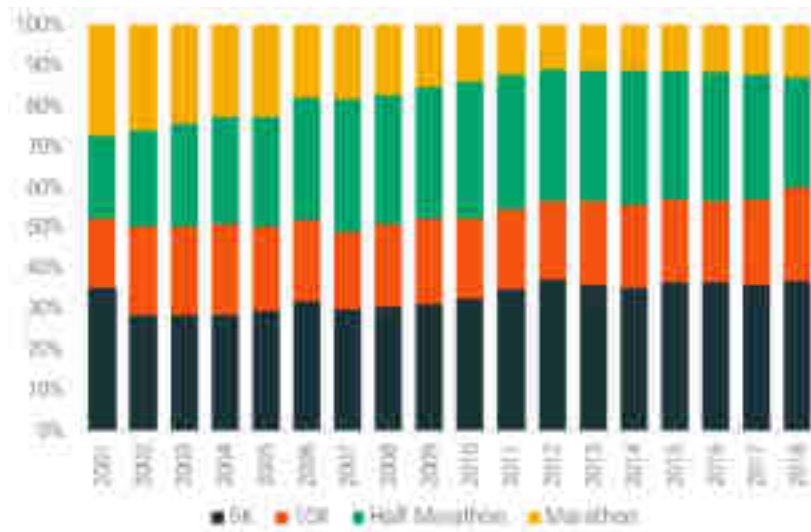


Figure 3 : Répartition au fil des années des coureurs en fonction de la catégorie d'âge [3]

La moyenne d'âge des participants s'inscrivant à une épreuve de course à pied est de **39,3 ans** en 2018, contre **35,2 ans** en 1986. En ce qui concerne le marathon, la moyenne d'âge des coureurs est de **40 ans**. Cependant il existe une augmentation de la proportion des marathoniens les plus jeunes (moins de 20 ans), de 1,5% en 1986 à 7,8% en 2018. Malgré cette augmentation, la part des 40-50 ans reste la plus importante (28,6% des marathoniens), ce qui montre que le marathon est un but et un achèvement dans la vie d'un coureur et doit se préparer tant physiquement que mentalement [3].

Cette discipline a connu une forte popularité entre les années 1970 et les années 1990. En effet, au début des années 70, seuls deux ou trois marathons étaient organisés par an, avec une dizaine de participants, tandis que dans les années 1990, une centaine de marathons étaient organisés par an avec environ 44000 participants. De plus, l'engouement pour la course à pied et l'épreuve du marathon n'a cessé de croître avec la mise au point de chaussures de sport dédiées à la course à pied dans les années 70. C'est le marathon de New York en 1976 accueillant un grand nombre d'élites et de nombreux coureurs amateurs qui a permis de rendre cette épreuve si populaire.

La course de fond sur route s'est développée à partir des années 70 grâce à de nombreux facteurs. La course à pied est un moyen de sociabilisation ; ce sport permet de rencontrer du monde, de discuter et de s'entourer. Il est souvent cité comme un sport pratique du fait d'un besoin minimum en équipement

et en structures sportives, de l'absence d'horaires ou de contraintes. La course d'endurance est également reconnue pour avoir un coût faible et engendrer du plaisir facilement.

Le marathon est une compétition sportive qui s'est démocratisée et internationalisée au fil du temps. Parmi les marathons prestigieux, on retrouve le marathon des JO, ayant lieu toutes les quatre années, le marathon des Championnats du Monde toutes les deux années, le marathon des Championnats d'Europe et les marathons des Worlds Marathons Majors ayant lieu chaque année et qui regroupent les marathons majeurs mondiaux : Tokyo, Boston, Londres, Berlin, Chicago et New York.

Cette course est exigeante et demande une préparation physique détaillée et planifiée en amont de la course.

1.1.3 Valeurs physiologiques

Les séances d'entraînement durant la préparation d'un marathon ainsi que la progression du coureur de fond sont corrélées aux sensations pendant la course à pied, mais pas uniquement. En effet, certains paramètres facilement quantifiables, contrôlables et exploitables relient la performance du sportif à sa physiologie. Ces paramètres permettent d'orienter et de structurer les séances d'entraînement de course à pied.

Il faut tout d'abord comprendre que lors d'une activité physique, le corps humain a besoin d'un apport continu d'énergie qu'il trouve dans l'alimentation et les nutriments stockés. Notre corps va donc utiliser différentes voies métaboliques, en fonction des substrats à disposition et de l'intensité de l'exercice. On différencie deux processus de génération d'énergie par les muscles en fonction de l'intensité de l'exercice : le processus dit « **aérobie** », qui nécessite l'utilisation d'oxygène et le processus dit « **anaérobie** » qui ne nécessite pas d'utilisation d'oxygène. Ces deux voies métaboliques jouent un rôle majeur dans les séances de course de fond, c'est pourquoi il est important de connaître leurs significations [4].

Elles sont complémentaires :

- La voie **anaérobie** : premier processus à se mettre en place au début de l'exercice : il dure environ trois minutes. Cette voie est utilisée pour des exercices de haute intensité, n'utilisant pas d'oxygène. Le travail réalisé en voie anaérobie permet d'améliorer l'allure/l'intensité de course.
- La voie **aérobie** : second processus à se mettre en place ; cette voie prend le relais de la voie anaérobie. Elle utilise l'oxygène pour produire de l'énergie. Cette voie est utilisée pour des exercices de basse intensité, pendant une longue durée. Le travail sur la voie aérobie améliore la

durée/distance de course : elle correspond à de l'exercice d'endurance ou de l'exercice cardiovasculaire.

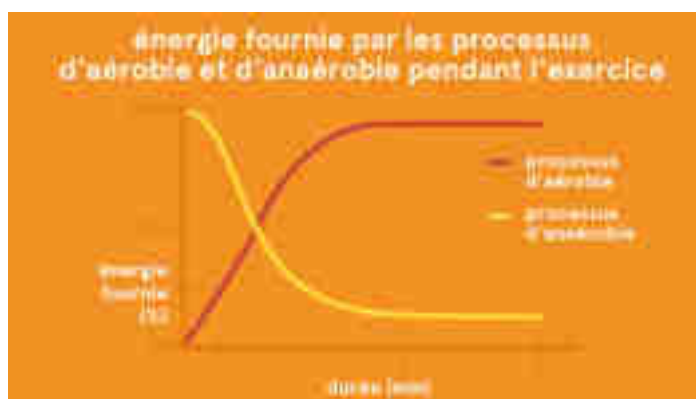


Figure 4 : Énergie fournie par les processus d'aérobie et d'anaérobie pendant un exercice [4]

La voie anaérobie fonctionne sur une courte durée : elle intervient dès le début d'un exercice, mais aussi lors d'exercices d'intensité élevée [7].

Le principal paramètre permettant de distinguer si l'organisme fonctionne en voie aérobie ou anaérobie est le **Volume d'Oxygène Maximal (VO2max)** exprimée en $\text{mLO}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Il correspond à la consommation maximale d'oxygène utilisable par minute rapportée au poids corporel pour produire de l'énergie. Sur le plan physiologique, le VO2max signifie que la fixation sanguine maximale d'oxygène est atteinte. Au-delà de cette fixation maximale d'oxygène, lors d'une augmentation de l'intensité de l'exercice par exemple, on bascule dans le processus anaérobie. Ce palier de saturation est le témoin indirect des capacités d'endurance [5]. Le VO2max est :

- Personnelle,
- Optimale lors de la puberté,
- 15 à 20 % inférieure chez les femmes que chez les hommes au même âge,
- Perfectible de 20 % à 25 % grâce à l'entraînement,
- Dépendante de paramètres tels que la pression partielle en oxygène dans l'air inspiré, l'altitude, la ventilation et la capacité pulmonaire, la vitesse de diffusion des gaz alvéolaires, le débit sanguin et la capacité vasculaire [5].

Excellent	M > 63	F > 58
Bon	M > 53-62	F > 48-57
Plus haute que moyenne	M > 47-51	F > 42-47
Moyenne	M > 43-46	F > 39-41
Plus bas que moyenne	M > 38-42	F > 34-38
Pauvre	/	/

Figure 5 : Valeurs prédictives indicatives du VO2max en mL.min⁻¹.kg⁻¹ [4]

La **Vitesse Maximale Aérobie (VMA)** exprimée en km.h⁻¹ ou **Puissance Maximale Aérobie (PMA)** en Watts est la vitesse ou puissance à partir de laquelle un coureur atteint sa consommation maximale d'oxygène (VO2max). La VMA est la valeur concrète et chiffrée en distance ou en temps de la VO2max : c'est la valeur maximale à laquelle l'organisme fonctionne en aérobie. Il s'agit du paramètre le plus couramment utilisé par les entraîneurs pour mettre en place des séances d'entraînements. Il est important de déterminer sa VMA en amont de la préparation d'un marathon, afin de définir les allures cibles des séances d'entraînement. Pour cela plusieurs tests permettant de déterminer sa VMA existent [6] :

- Le test en laboratoire : il se réalise sur un tapis roulant ou un cycloergomètre. La vitesse du tapis roulant/cycloergomètre est au départ de 9 à 10 km.h⁻¹ chez les sujets sédentaires et de 11 à 12 km.h⁻¹ chez les sujets entraînés. Cette vitesse est augmentée par palier de 0,5 km.h⁻¹. Le sujet est équipé d'un masque, relié à une turbine qui tourne plus ou moins vite en fonction de la respiration. Un tuyau mesure l'oxygène inspiré et expiré, ainsi que le dioxyde de carbone expiré par l'individu. À partir de ces mesures on peut calculer le VO2 consommé. Le VO2max est atteinte lorsque ce volume (ainsi que la fréquence cardiaque) atteint un plateau tandis que l'intensité de course augmente toujours. La vitesse à laquelle le VO2max est atteinte est la VMA.
- Les tests de terrain :
 - **Tests continus à intensité constante** :
 - *Test de Cooper*, l'un des plus connus, consiste à courir en 12 minutes, la plus grande distance possible à allure constante. La formule $VMA = (distance \text{ en km} / 2) * 10$ permet d'obtenir sa VMA à partir de la distance parcourue.

- *Test Semi-Cooper*, consiste quant à lui à courir en 6 minutes, la plus grande distance possible. La formule $VMA = \text{distance en km} * 10$ permet d'obtenir sa VMA à partir de la distance parcourue.
- **Tests progressifs continu :**
 - *Test Vameval*, se réalise sur une piste d'athlétisme de 400 mètres, avec un plot tous les 20 mètres et une vitesse augmentant de $0,5 \text{ km.h}^{-1}$ toutes les minutes. Les temps de passage sont donnés par un signal sonore. Le test démarre à 8 km.h^{-1} . La VMA correspond à la vitesse atteinte au niveau du dernier plot franchi dans les temps.
 - *Test Léger-Boucher*, est une variante du test Vameval, où la distance entre deux plots est de 50 mètres, avec une augmentation de la vitesse d' 1 km.h^{-1} toutes les deux minutes.

Le **seuil aérobie (SA)** correspond au seuil auquel le métabolisme aérobie couvre la totalité des besoins énergétiques pendant l'effort. Le sportif peut courir pendant une très longue durée à une intensité basse, soit 50-60 % de la VMA. On nomme également ce seuil « l'endurance fondamentale », car cette allure bien précise ne permet pas de progresser, mais permet de récupérer des séances plus intenses, d'améliorer le renforcement articulaire et ligamentaire et de limiter la fatigue musculaire [7].

Le **seuil anaérobie (SAN)** correspond au seuil auquel le métabolisme aérobie ne couvre plus la totalité des besoins énergétiques pendant l'effort ; le métabolisme anaérobie est majoritaire. Il correspond en moyenne à 85% de la VMA. Au-delà de ce seuil anaérobie, l'augmentation de l'intensité de l'exercice, entraîne une diminution de la durée de l'exercice. On peut notamment comparer deux coureurs ayant la même VMA ; ils peuvent avoir un temps de course sur une course de 10 km très différent. Cette différence est due à un SAN différent : le coureur 1 aura un SAN à 85% de sa VMA, tandis que le coureur 2 aura un SAN à 70% de sa VMA. La VMA étant faiblement modifiable (environ 20%), on peut donc travailler sur l'augmentation du seuil anaérobie, afin de diminuer la zone de transition aérobie-anaérobie et d'augmenter sa capacité d'endurance [7].

La **Vitesse Spécifique (VS)** est la vitesse de croisière sur une distance ou une durée donnée. Elle correspond donc à une allure bien spécifique à maintenir sur une distance ou une durée. Avoir une vitesse spécifique cible permet de la maintenir pendant un entraînement ou une compétition, mais aussi de l'améliorer pendant les semaines précédant une compétition (Figure 6) [7].

Distances de compétition	% VMA Course sur piste	Corrélations VMA-performance
400 m	145 à 155	n.d.
800 m	120 à 125	0,72 (n = 40)
1000 m	105 à 115	0,92 (n = 105)
1500 m	101 à 111	0,92 (n = 105)
2000 m	98 à 102	0,95 (n = 71)
3000 m	95 à 100	0,98 (n = 69)
5000 m	90 à 95	0,98 (n = 69)
10000 m	85 à 90	0,88 (n = 108)
20000 m	80 à 88	0,88 (n = 108)
marathon	75 à 84	0,85 (n = 108)

n : nombre de sujets évalués; n.d. : non déterminé, seulement 4 sujets.

Figure 6 : Pourcentage de la VMA maintenue sur différentes distances en compétition [6]

1.1.4 Le programme d'entraînement

La motivation des coureurs de fond pour participer à un marathon diffère en fonction des sportifs ; devenir marathonien, réussir en moins de 4h30 ou en moins de 4h, etc ... Dans chaque situation, il est indispensable de s'entraîner en amont de la course, que ce soit à l'aide d'un plan d'entraînement bien défini ou non.

L'objectif principal de l'entraînement est d'habituer l'organisme à des efforts répétitifs et progressifs via des stimuli extérieurs. Celui-ci s'adaptera de manière positive en améliorant la qualité des efforts, c'est-à-dire en augmentant l'intensité de course et/ou la distance parcourue. L'entraînement est donc basé sur le principe de « surcompensation » : la régénération des tissus et des substrats dégradés lors d'un effort intense dépasse l'état initial de l'organisme. Ainsi, après la période de récupération d'une séance (environ deux jours), on considère qu'il y a un accroissement des facultés de travail, ce qui permet d'enchaîner sur une nouvelle séance et ainsi de suite durant les semaines précédant la compétition.

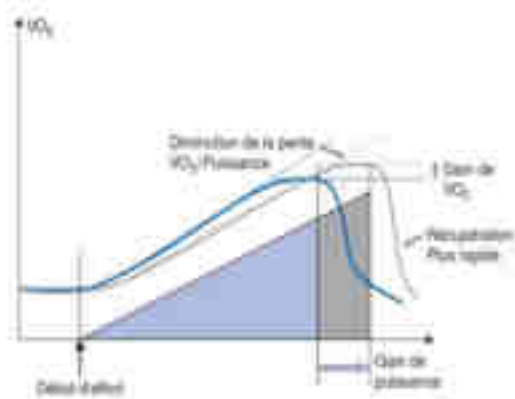


Figure 8 : Évolution comparative de la courbe de consommation d'oxygène chez un même sujet entre deux périodes d'entraînement



Figure 7 : Schéma du mécanisme de surcompensation pendant un plan d'entraînement [4]

L'entraînement repose sur plusieurs caractéristiques :

- La fréquence hebdomadaire des séances
- Le niveau d'intensité de l'effort
- La distance parcourue pendant l'effort
- Le nombre de répétitions
- La récupération

L'entraînement à un marathon débute entre 8 et 12 semaines avant la compétition. On considère que la distance minimale hebdomadaire d'entraînement est celle du marathon, soit 42 kilomètres, ce qui représente environ 3 séances par semaine. Les personnes s'entraînant plus souvent (60 à 80 kilomètres hebdomadaires, soit 5 à 6 séances par semaine) seront mieux préparées. À titre de comparaison, les coureurs professionnels internationaux (moins de 2 heures 15 minutes) courent environ 150 km par semaine. Les séances d'entraînements types sont les suivantes :

- La séance dite « **fractionnée** » : il s'agit de morceler la charge globale de la séance en plusieurs séries de répétitions, d'intensité et de durée précises. L'intensité des séries se situe au-dessus de 80% de la VMA. Entre chaque répétition, une période de récupération de durée inférieure ou égale à l'effort est donnée. Ces séances permettent de travailler en anaérobie : elles améliorent la VMA et le SAN. Un exemple de séance à allure VMA est le 2x(6x400m) avec 40 secondes de récupération entre chaque répétition et 3 minutes entre les deux séries.

- La séance dite « **d'endurance fondamentale** » : il s'agit d'une séance à allure régulière, au seuil aérobie, soit environ 50-60% de la VMA. Ces séances permettent de travailler sur les capacités aérobies : elles améliorent les capacités cardiovasculaires, servent de base pour le travail qualitatif (augmentation du nombre de capillaires sanguins et de mitochondries dans le muscle, renforcement des muscles, des tendons et des articulations) et permettent de récupérer des entraînements fractionnés. Ces séances n'ont pas d'effet sur l'allure cible de course.
- La séance dite « **longue** » : il s'agit d'une sortie longue, une fois par semaine, pour habituer l'organisme à courir sur une longue distance. Cette sortie longue peut se faire dans un autre sport d'endurance comme le cyclisme, la natation, le ski [6].

Type d'exercice	Caractéristiques	Durée	% VMA	Récupération	Développement	
Continu	Inframaximal, longue durée, type marathon, long slow distance (LSD)	>30 min	50 à 80		Endurance aérobie	
Mixte	Fartlek : Intense/modéré (1/5, 1/4, 1/3, 1/2)	>20 min	110 à 140	Active 40-60 % VMA	Endurance + PMA	
Par intervalles	Longs	Inframaximal, maximal	5-8 min, 4 à 6 fois	30 à 100	Passive 1-2 min	Endurance + PMA + capacité lactique
	Moyens	Maximal et supramaximal	20 s à 3 min, 3 à 5 fois	100 à 140	Passive 3-4 min	Capacité lactique + PMA
	Courts	Intermittents courts	10 à 20 s, 30 à 40 fois	110 à 130	Passive 15-20 s	PMA

Figure 9 : Panel de types d'exercices en fonction de la durée, du pourcentage de VMA, de la récupération et du développement cible [6]

La combinaison d'entraînements fractionnés et d'entraînements d'endurance avec volume permet à notre organisme de développer plusieurs fonctions : augmentation de la densité capillaire au niveau des muscles squelettiques, augmentation de la synthèse de mitochondries, augmentation du volume cardiaque systolique, augmentation du débit cardiaque, augmentation de la fixation d'oxygène. Mais alors à quelle fréquence le marathonien doit-il courir des entraînements de type fractionné ? Et à quelle allure les mener ?

L'intensité de l'entraînement est définie selon des paramètres physiologiques (fréquence cardiaque, lactatémie), selon des conditions extérieures (allure de course, type d'entraînement) et selon la perception du coureur. On peut séparer les intensités de course en 7 zones distinctes, en fonction de l'intensité :

- Exercice de Faible Intensité (*Low Intensity Training : LIT*) : Zone 1 et 2
- Exercice d'Intensité Modérée (*Moderate Intensity Training : MIT*) : Zone 3
- Exercice à Haute Intensité (*High Intensity Training : HIT*) : Zone 4, 5 et 6

1.2.1 La dépense énergétique globale

La dépense énergétique totale quotidienne d'un individu correspond à sa quantité d'énergie dépensée pour assurer :

- Son **métabolisme de base** (ou de **repos**) (60-75%) : il s'agit de l'énergie nécessaire pour maintenir les fonctions de base de l'organisme, comme le rythme cardiaque et la respiration. Il est mesuré au repos complet, à jeun et à température constante. Il représente deux tiers de la dépense énergétique globale d'un individu et est plus important chez l'homme que chez la femme [10].
- Sa **thermogénèse** (10%) : elle représente l'énergie nécessaire pour digérer et stocker les nutriments. Ce poste de dépense énergétique peut être modifié par certains facteurs, par exemple le stress, la nicotine ou la caféine qui vont avoir tendance à augmenter les dépenses énergétiques [10].
- Son **activité physique** : la dépense énergétique qu'elle engendre est tout d'abord variable selon les individus (sédentaire ou actif, sexe, génétique), mais elle fluctue également en fonction de la durée, de l'intensité et du type d'activité physique [10].

1.2.2 La dépense énergétique du marathon

La dépense énergétique d'une activité quelle qu'elle soit est donnée en MET (Metabolic Equivalent Task). Le MET correspond à la quantité d'énergie dépensée par rapport au métabolisme de repos. Cette unité est standardisée, afin de pouvoir comparer différentes activités [11]. Ainsi :

$$1 \text{ MET} = 1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \quad \text{ou} \quad 1 \text{ MET} = 4,184 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$$

Pour information, 1 MET correspond à l'énergie nécessaire pour rester tranquillement assis. L'échelle d'équivalent métabolique de Ainsworth et Al, appelée Compendium, établit des MET standardisés pour différentes activités, allant de 0,9 MET pour le sommeil à 18 MET pour une course à 17,5 km.h⁻¹.

Activité physique	Nombre de METs
Jouer d'un instrument de musique	2,0
Promener son chien	3,0
Bowling	3,0
Surf, Pilate, Yoga	3,0
Pêche	3,5
Cyclisme de loisir (<16 km.h ⁻¹)	4,0
Badminton, équitation, natation brasse loisir	5,5
Marche randonnée	7,0
Marche à plat 7 km.h ⁻¹ , rythme modéré	7,0
Marche en montée (6 à 15 %), 4,5-5 km.h ⁻¹	8,0
Tennis en simple	8,0
Cyclisme à 22,5-25,6 km.h ⁻¹	10,0
Cyclisme à 25,7 – 30,6 km.h ⁻¹	12,0
Corde à sauter	12,3
Patinage	14,0

Figure 11: Tableau indicatif du nombre de MET en fonction de l'activité physique

A titre indicatif, au repos une femme consomme 1900 à 2000 kcal/jour, tandis qu'un homme consomme 2000 à 2300 kcal/jour. La pratique d'une activité physique provoque une hausse de la dépense énergétique de 500 à 1000 kcal/h en fonction de l'intensité de l'activité physique. Quant à lui, le marathon nécessite une dépense énergétique de 750 à 1500 kcal.h⁻¹ selon la vitesse de course, soit environ 2500 à 3000 kcal [11].

À titre d'exemple, la dépense énergétique quotidienne d'un sportif entraîné (plus de 90 min/jour d'entraînement) varie entre 3 500 et 6 000 kcal. En ce qui concerne les femmes, la dépense énergétique

d'une sportive entraînée est située entre 2600 et 3300 kcal. La dépense énergétique journalière chez un sportif, qu'il soit amateur ou professionnel, est donc plus élevée que chez une personne sédentaire ; ses apports énergétiques doivent être qualitativement et quantitativement suffisants pour combler ses dépenses énergétiques.

Une variable similaire permettant de mesurer et comparer la dépense énergétique de différents individus lors d'une épreuve de course à pied est le coût énergétique. Ce dernier correspond à la mesure de la quantité d'énergie nécessaire pour déplacer un kilogramme sur un mètre. Il est différent de la dépense énergétique, car il introduit la notion de vitesse de déplacement lors de l'effort.

Le coût énergétique de la course à pied ne peut être calculé que lorsque celle-ci est réalisée en métabolisme aérobie. En effet, c'est l'oxydation des nutriments (glucides, lipides, protéines) qui permet de fournir de l'énergie. Le coût énergétique de l'activité physique dépend donc du Volume d'Oxygène consommé.

L'équation suivante, proposée par Di Prampero en 1986, permet de l'estimer le plus justement possible [12] :

$$Cr = (VO_2 - VO_2 \text{ repos}) \cdot \text{vitesse}^{-1}$$

Cr : Coût énergétique en $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

VO₂ : Volume Oxygène consommé en $\text{mlO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$

Vitesse : en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

La variation du coût énergétique de l'activité d'un sportif entraîne une variation des dépenses énergétiques, ainsi qu'une apparition plus ou moins tardive de la fatigue. Il est donc intéressant de savoir quels sont les facteurs de variabilité du coût énergétique, afin de pouvoir le minimiser.

Le coût énergétique varie en fonction de l'intensité de l'effort. Plusieurs modèles mathématiques ont été créés et utilisés pour illustrer la corrélation entre le coût énergétique représenté par le VO₂ et l'intensité représentée par la vitesse. C'est le modèle de régression linéaire qui est le plus largement utilisé et reconnu, grâce notamment à sa facilité d'utilisation et à sa justesse [13].

Cependant, cette relation n'est linéaire que pour des valeurs comprises entre 20% et 80% de la VO₂max. Ainsi pour une VO₂ et une intensité comprises dans cette fourchette, soit environ de 8 km.h⁻¹ à 20 km.h⁻¹, le coût énergétique augmente avec la vitesse de course [13]. Dans cet intervalle, il est intéressant de travailler sur des facteurs permettant de diminuer le coût énergétique.

De nombreux facteurs peuvent améliorer ou altérer le coût énergétique de la course à pied : ils peuvent être extrinsèques ou intrinsèques au coureur. Parmi les facteurs extérieurs, on retrouve la résistance à l'air qui augmente le coût énergétique. Pour des vitesses inférieures à 15,6 km.h⁻¹ la résistance à l'air est négligeable. La répartition du port de charges (sac à dos, ceinture, chaussures) joue également un rôle sur le coût énergétique : plus la charge portée est proche du centre de gravité, plus le geste sera efficace et plus bas sera le coût énergétique. Le coureur choisira donc de porter des chaussures légères afin de minimiser le coût énergétique de la course à pied. Parmi les facteurs inhérents au coureur, la mise en œuvre d'un programme d'entraînement diminue le coût énergétique d'une course à pied, d'une part grâce à l'amélioration des processus bioénergétiques et d'autre part grâce à une optimisation de la foulée (fréquence et longueur) [12].

1.2.3 La prise alimentaire : une régulation fine

La dépense énergétique journalière chez un sportif, qu'il soit amateur ou professionnel, est donc plus élevée que chez une personne sédentaire ; ses apports énergétiques doivent être qualitativement et quantitativement suffisants pour maintenir une balance énergétique équilibrée. Les mécanismes de régulation de la prise alimentaire sont contrôlés par le système nerveux central (SNC), qui reçoit des informations périphériques, nerveuses ou hormonales, qui permettent de réguler les besoins de l'organisme. Il existe deux voies hormonales principales :

- **Voie orexigène (stimule l'appétit)** : la sensation de faim (et donc la prise alimentaire qui s'ensuit) est stimulée par une hormone, la ghréline, sécrétée par la paroi de l'estomac. Cette hormone envoie un message au SNC via les neurones NPY et AgRP situés dans le noyau arqué de l'hypothalamus. Les neurones NPY et AgRP stimulent à leurs tours des orexines, telles que la Melanin Concentrating Hormon, qui stimule la prise alimentaire. Suite à la prise alimentaire, la concentration de ghréline sanguine décroît en fonction de la composition du bol alimentaire. Les glucides, les protéines et les lipides diminuent le taux de ghréline avec une efficacité respectivement décroissante. En effet après un repas riche en glucides, la chute du taux de ghréline est plus prononcée qu'après un repas riche en lipides : les glucides entraînent donc un sentiment de satiété plus rapidement que les lipides.

- **Voie anorexigène (stimule la satiété) :** la sensation de satiété est stimulée par une hormone ; la leptine, située dans le tissu adipeux blanc. La concentration sanguine de leptine est proportionnelle à la masse grasse corporelle. Cette hormone stimule les neurones POMC au niveau du noyau arqué de l'hypothalamus. Ces neurones produisent une hormone, la α -MSH (*α Melano Stimulating Hormone*) qui à son tour va stimuler les neurones Corticotrophin-Releasing Factor (CRF neuromédiateur du stress), qui inhibent la prise alimentaire [14].

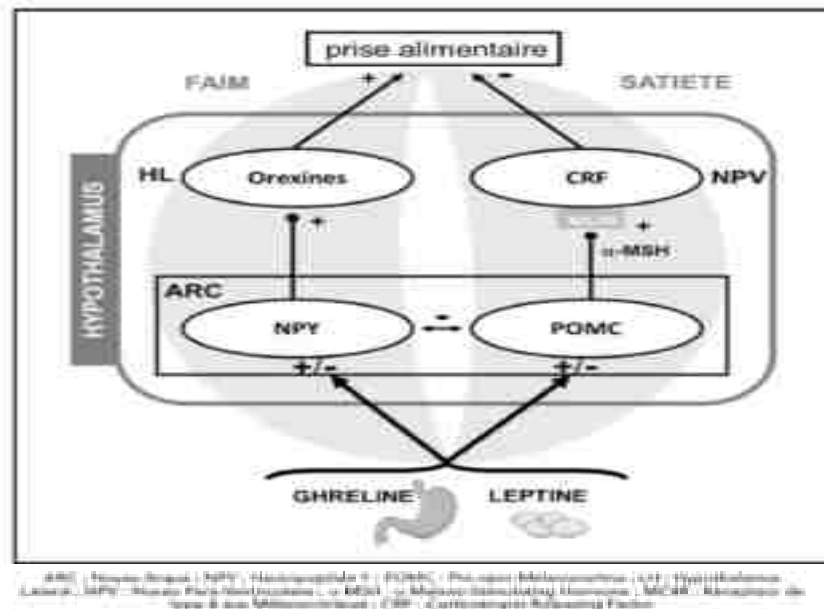


Figure 12: Les voies de régulation hypothalamique de la prise alimentaire [14]

La prise alimentaire entraîne également une régulation métabolique grâce notamment à la sécrétion d'hormones, dont :

- L'insuline : hormone hypoglycémisante sécrétée par le pancréas suite à un apport alimentaire. Sa sécrétion est liée à celle de la leptine ; la présence d'insuline augmente la production de leptine par le tissu adipeux, tandis qu'une hypo-insulinémie diminue la concentration de leptine circulante. L'insuline va également diminuer l'oxydation des acides gras. Elle entraîne un sentiment de satiété et aura pour effet de stopper la prise alimentaire [14].
- La cholécystokynine : hormone peptidique gastro-intestinale, sécrétée par la muqueuse du duodénum, lors du passage de protéines et de lipides. En se liant à ses récepteurs au niveau du SNC, cette hormone favorise la digestion ainsi que le sentiment de satiété [15].

La pratique d'une activité physique va entraîner une modification de la balance énergétique. Face à une augmentation des dépenses énergétiques, la fréquence, la qualité et la quantité des apports alimentaires sont-ils modifiés ?

Tout d'abord, il a été démontré que suite à un exercice physique, il s'ensuivait une anorexie précoce, appelée également « suppression de l'appétit induite par l'exercice ». Celle-ci est plus marquée lors d'exercices d'intensité élevée (60% du VO₂max), mais elle reste transitoire ; l'appétit est restauré dans les 2 heures qui suivent l'exercice [16].

À court terme, c'est-à-dire dans les jours qui suivent un effort physique, il semble qu'il n'y ait pas d'apport énergétique compensatoire significativement différent de la situation de repos. En effet, la libération de la cholécystokinine ainsi que du CRF qui sont deux hormones anorexigènes, entraîne un sentiment de satiété et inhibe la prise alimentaire. Suite à un effort physique, la balance énergétique est donc négative.

À plus long terme, la pratique régulière d'une activité physique entraîne une augmentation de l'apport énergétique. En effet, deux mécanismes sont à l'origine de cette stimulation de la prise alimentaire :

- La baisse de la leptine plasmatique, ainsi que de l'insuline : celle-ci est liée à la diminution de la masse grasse.
- L'augmentation de la synthèse du neuropeptide NPY, qui est un peptide orexigène important.

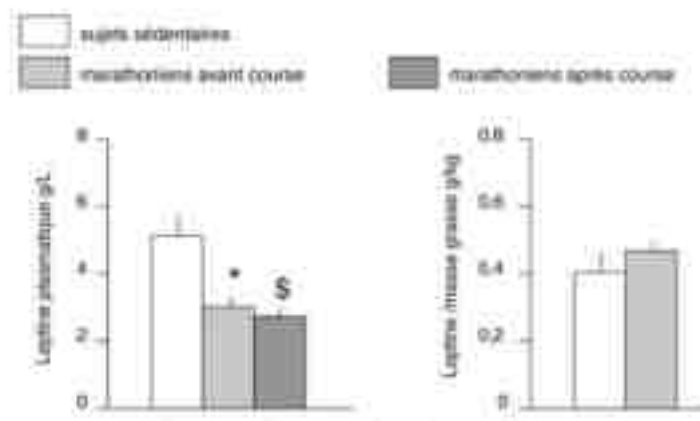


Figure 13 : Leptinémie mesurée au repos chez des sujets sédentaires, marathoniens avant et après course (A), ainsi que le débit de production de leptine par le tissu adipeux blanc (B) [7]

Afin d'équilibrer la balance énergétique suite à un effort physique, les apports doivent être quantitativement suffisants ainsi que qualitativement similaires aux substrats oxydés. Les glucides et les

lipides sont principalement oxydés, tandis que les protéines sont très peu utilisées durant un effort. Plusieurs études ont montré que les personnes utilisant majoritairement des glucides lors de leurs efforts auraient un apport énergétique plus élevé pendant la récupération, tandis que les personnes utilisant plus de lipides auraient un apport énergétique plus faible durant la récupération. En effet, l'apport alimentaire suite à un effort est plus sensible à la déplétion des réserves en glucides, notamment à cause de sa réserve limitée et de sa rapide métabolisation [7].

1.3 Les principales sources d'énergie du sportif

1.3.1 Les glucides

Les glucides sont des composés organiques, ayant une unité de base, appelée « ose », constituée d'un groupement carbonyle (aldéhyde ou cétone) et d'au moins deux groupes hydroxyles. On classe les glucides selon deux catégories distinctes :

- Les glucides digestibles, directement ou après avoir subi une dégradation par les enzymes digestives :
 - Les **oses** ou **monosaccharides**, sont des molécules simples, non hydrolysables. On y retrouve le glucose, le fructose, le mannose et le galactose [17].
 - Les **osides**, sont des molécules complexes, hydrolysables, constituant un assemblage de plusieurs oses, grâce à une liaison osidique. On y retrouve notamment :
 - Les holosides, composés uniquement d'oses. Ils se divisent en oligosaccharides, composés d'un nombre limité de sucres (<10) ; 1 saccharose = 1 glucose + 1 fructose ou encore 1 lactose = 1 galactose + 1 glucose. L'autre catégorie s'appelle les polysaccharides, composés d'un nombre illimité de sucres (>10) ; cellulose, amidon et glycogène [18].
 - Les hétérosides, composés d'oses et d'une molécule non glucidique appelée aglycone [17].
- Les glucides non digestibles, et donc non assimilables par l'organisme : il s'agit des fibres alimentaires [17].

Les glucides, ainsi que les lipides et les protéines font partie des macronutriments essentiels au bon fonctionnement de notre organisme. Les glucides ont tout d'abord un rôle énergétique : ils sont la plus grande source d'énergie pour l'organisme. Cette énergie est disponible soit sous forme de glucose circulant (ou plasmatique), soit de glucose en réserve : le glycogène stocké au niveau du foie et des muscles. Ces réserves en glycogène sont limitées à 100 grammes au niveau du foie et 300 à 400 grammes au niveau des muscles. Le glycogène est donc la principale source d'énergie durant quelques heures dans des exercices de moyenne à haute intensité (65-85% du VO₂max). Le glycogène est une molécule de la classe des holosides, composée d'un enchaînement de molécules de glucose. Sa production et sa dégradation sont finement régulées, via des hormones telle que l'insuline, ou encore dans le cas de situations physiologiques telle que l'activité physique. Il existe deux voies métaboliques de régulation du glycogène distinctes :

- La **glycogénolyse** : elle permet la dégradation du glycogène en glucose
- La **glycogénogénèse** : elle permet la synthèse du glycogène à partir du glucose.

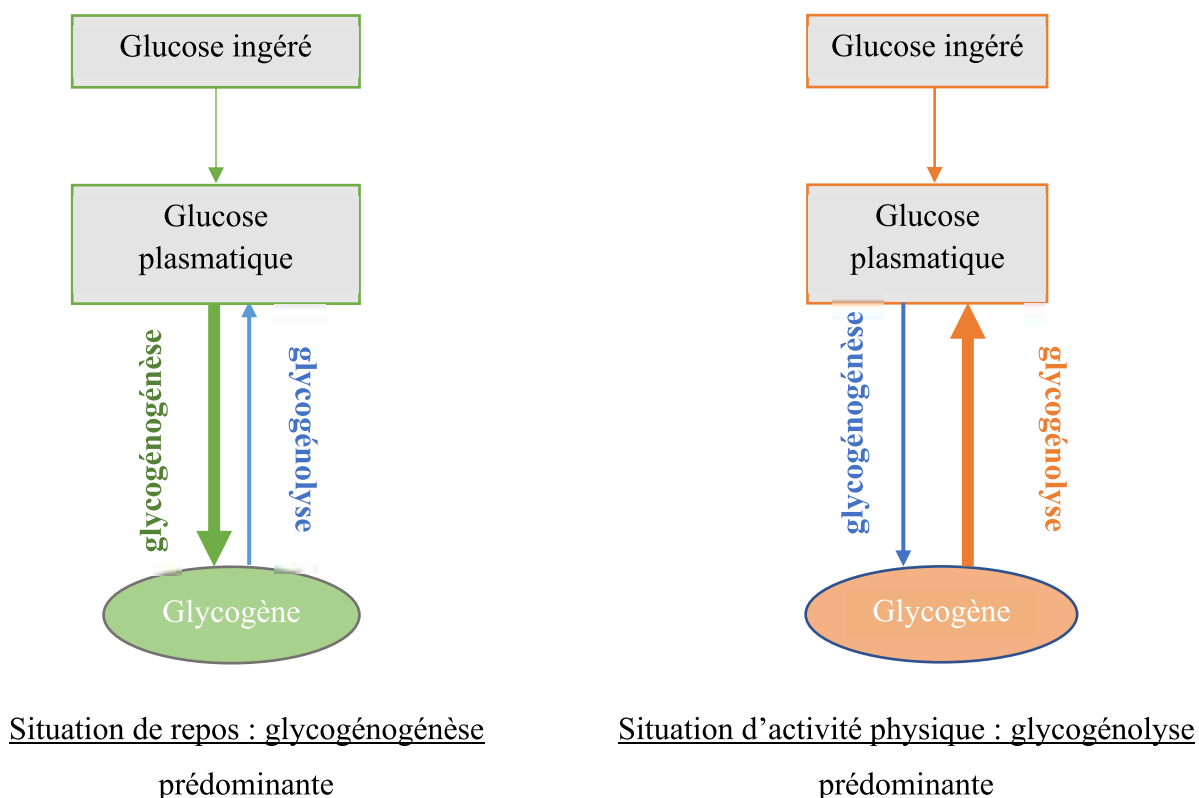


Figure 14 : Schémas de la glycogénogénèse et de la glycogénolyse

Les glucides ont aussi un rôle structurel ; ils participent au maintien des structures cellulaires de l'organisme. Les glucides sont également responsables du sentiment de satiété après un repas : ils permettent une décroissance rapide de la concentration de ghréline circulante [19].

Cependant, tous les glucides ne sont pas équivalents et n'ont pas les mêmes bienfaits : par exemple certains glucides entraînent un pic de glycémie et un sentiment de satiété bref (environ 1 heure), ce sont les glucides à Index Glycémique (IG) élevé. D'autres glucides entraînent une glycémie stable et un sentiment de satiété perdurant dans le temps (6h-7h), ce sont les glucides à IG bas. L'index glycémique d'un aliment correspond à sa capacité à augmenter la glycémie sur les 3 heures qui suivent son ingestion. Il est compris entre 0 et 100, 100 étant l'IG du glucose. On différencie donc les glucides à IG faible (<55), de ceux à IG moyen (56<IG<70) et des IG élevé (>70) [18].

L'index glycémique d'un aliment dépend de nombreux facteurs, tels que :

- La **cuisson** : des pâtes très cuites auront un IG supérieur aux pâtes dites « al dente »
- La **composition chimique** : le glucose étant directement absorbé, les aliments en contenant majoritairement auront un IG plus élevé que des aliments contenant majoritairement du fructose, ce dernier étant au préalable métabolisé au niveau du foie.
- La **maturation** : dans le cas de fruits et de légumes bien mûrs, l'IG augmente. C'est le cas des bananes qui ont un IG de 40, celui-ci est de 65 lorsqu'elles sont bien mûres.
- La **présence de lipides** : la présence de graisses va ralentir la vidange gastrique et diminuer l'absorption des glucides, c'est le cas notamment des biscuits, chocolats, qui ont un IG moyen.
- La **présence de fibres hydrosolubles** : les fibres vont diminuer l'IG, c'est le cas des pains de seigles et d'avoine, qui ont un IG inférieur au pain blanc.
- La **quantité totale d'aliments ingérés** : l'IG est calculé pour une quantité de 50 g de glucides ingérés. Or pour atteindre cette dose, il est nécessaire parfois de manger de grande quantité, par exemple les carottes ont un IG de 49, pour une quantité de 600 grammes de carottes. [18]

	IG faible	IG moyen	IG élevé
Produits sucrés	<ul style="list-style-type: none"> - Chocolat (> 70% de cacao) - Yaourt 	<ul style="list-style-type: none"> - Chocolat au lait - Miel, sirop d'érable, sirop d'agave, confiture - Biscuit sec, crêpe, flan 	<ul style="list-style-type: none"> - Chocolat blanc - Bonbons gélifiées, brioche, gâteau de riz - Croissant, pain au lait
Céréales	<ul style="list-style-type: none"> - Pain aux céréales complètes (sarrasin, intégral) - Farine de seigle - Riz complet (brun), sauvage (rouge), pâtes complètes - Taboulé, quinoa, boulgour entier 	<ul style="list-style-type: none"> - Flocons d'avoine, muesli, orge - Farine de blé noir - Riz basmati, pâtes blanches, - Polenta, semoule 	<ul style="list-style-type: none"> - Pain blanc, sans gluten, de mie complet, - Céréales soufflées - Farine blanche - Galette de céréales (riz, maïs) - Pommes de terre (bouillie, au four, en purée, frites) - Gnocchis
Légumineuses	<ul style="list-style-type: none"> - Haricot (blanc, rouge, noir), flageolet, lentille verte, petits pois, pois cassé, pois chiche, topinambour 		
Graines	<ul style="list-style-type: none"> - Amande, arachide, graine de soja, noisette, noix (de cajou, de pécan, du Brésil), pistache 		

	IG faible	IG moyen	IG élevé
Légumes et fruits	<ul style="list-style-type: none"> - Avocat, carotte crue, chou, céleri, concombre, courge, épinard, patate douce (bouillie), piment, poivron, salade, - Banane (verte), cerise, clémentine, fraise, framboise, kiwi, litchi, pêche, poire, pomme, prune, raisin 	<ul style="list-style-type: none"> - Betterave rouge, patate douce (au four) - Abricot, ananas, melon, papaye - Figue séchée, pruneau, raisins secs 	<ul style="list-style-type: none"> - Carotte cuite, datte, pastèque, banane (mûre), - Fèves

Figure 15 : Exemples d'indice glycémique de certains aliments [28]

Les recommandations actuelles de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail (ANSES) sont de consommer 40 à 55% de glucides par jour par rapport à l'Apport Énergétique Total (AET), c'est-à-dire 5 à 10 g.kg⁻¹.jour⁻¹. Chez les sportifs cette consommation peut aller jusqu'à 12 g.kg⁻¹.jour⁻¹, soit 50% à 60% de l'AET, pour maximiser les réserves de glycogène. La quantité d'énergie fournie est de 4 kcal par gramme de glucides. Cependant les glucides à IG bas, tels que les produits laitiers, les légumineuses et les légumes sont à privilégier chez les sportifs, car ils améliorent les capacités d'endurance, en épuisant plus tardivement les réserves en glycogène. À l'inverse, lors d'une phase de récupération, les glucides à IG élevé sont à favoriser, car ils permettent un réapprovisionnement des réserves en glycogène plus rapide. L'appauvrissement de ces réserves glucidiques sont, chez le sportif d'endurance, la principale cause d'épuisement [19].

1.3.2 Les lipides

Les lipides sont des molécules hydrophobes ou amphiphiles (c'est-à-dire ayant une partie polaire et une partie apolaire), classées en différentes catégories selon l'Union Internationale de Chimie Pure et Appliquée (UIPAC), parmi lesquelles :

- Les **acides gras (AG)** sont les constituants de base des lipides alimentaires, dont le rôle est d'apporter de l'énergie. Ce sont des molécules hydrophobes, composées d'une chaîne

hydrocarbonée et d'un acide carboxylique en bout de chaîne. Leur classification se fait selon le nombre de carbone de la chaîne carbonée, ainsi que selon le degré d'insaturation (c'est à dire le nombre de doubles liaisons). Ils ont chacun un nom courant, un nom systématique, ainsi qu'une dénomination symbolique, qui permet de retrouver leurs structures chimiques : **Dénomination symbolique : Nbre de carbone : Nbre d'insaturation (Position de l'insaturation)** [20]

Nom commun	Dénomination symbolique	Nom officiel	Structure
acide myristique	14:0	n-tétradécanoïque	
acide palmitique	16:0	n-hexadécanoïque	
acide stéarique	18:0	n-octadécanoïque	
acide oléique	18:1(8)	cis-8 octadécénoïque	
acide linoléique	18:2(6,12)	cis-cis-6,12 octadécadiénoïque	
acide α-linolénique	18:3(6,12,15)	totot cis-6,12,15 octadécatriénoïque	

Figure 16 : Structure chimique et nomenclature de quelques acides gras naturels courants [18]

On les classe selon les catégories suivantes :

- Acides Gras Saturés (AGS), qui ne possèdent aucune double liaison. Ils doivent constituer 25 % de notre apport lipidique journalier. Ils proviennent de la synthèse endogène au niveau du foie, du cerveau et du tissu adipeux, ainsi que de l'alimentation. Parmi ces derniers, on retrouve :
 - ✓ Les AGS à chaîne courte ou moyenne (acide caprylique, acide butyrique, acide caproïque) : ils sont une source rapide d'énergie et ont un effet bénéfique sur la santé.
 - ✓ Les AGS à longue chaîne carbonée (acide laurique, acide myristique, acide palmitique) : ils ont un effet délétère sur la santé, en étant athérogène [20].

Teneur en acides gras saturés en g/100g d'aliment	Aliment
15-20	Fromage fondu à 70% matière grasse (MG), beaufort, cantal, comté, huile d'arachide, lait de coco, chocolat au lait, salami, rillettes, chorizo, pâté de foie de porc, chocolat au lait
20-30	Crème fraîche, fromage de chèvre, beurre allégé, fromage frais 70% MG, roquefort, graisse d'oie, noix de coco fraîche
30-40	Lard, Graisse de canard
40-50	Saindoux, noix de coco sèche
50-65	Beurre, beurre de cacao
80-90	Végétaline, huile de palme

Figure 17 : Exemples d'aliments riches en acides gras saturés [27]

- Acides Gras Mono Insaturés (AGMI), qui possèdent une seule double liaison. Ils doivent constituer 60% de la ration lipidique journalière. Tout comme les AGS, ils proviennent de notre alimentation ainsi que de la synthèse endogène. Parmi les AGMI, on retrouve l'acide oléique qui est très répandu dans notre alimentation ; il représente 70% du contenu des huiles [20].
- Acides Gras Poly Insaturés (AGPI), qui possèdent plusieurs doubles liaisons. Ils doivent constituer 15% de l'apport lipidique total journalier. Cependant, les AGPI sont une catégorie d'AG dits « essentiels » : ces AG ainsi que leurs précurseurs de synthèse ne sont pas synthétisés par l'organisme et doivent être apportés par l'alimentation. On retrouve dans cette catégorie d'AG « essentiels » :
 - ✓ Les AG w3 : l'acide eicosapentaénoïque (EPA) et l'acide docosahexaénoïque (DHA) dont le précurseur est l'acide α -linoléique. L'EPA a des effets bénéfiques sur le système cardiovasculaire, ainsi que dans les troubles métaboliques, en permettant une meilleure utilisation et élimination des lipides. Le DHA a des

effets bénéfiques au niveau du SNC en synthétisant des molécules neuroprotectrices et améliore la vision [21].

Teneur en acide α -linoléique en g/100g d'aliment	Aliment
1-1,5	Huile mélangée équilibrée, Huile de poisson, graisse de volaille, beurre
6-7	Huile de soja, de germes de blés, noix séchée
8	Huile de colza
12	Huile de noix

Figure 18 : Exemples d'aliments riche en acide α -linoléique [27]

- ✓ Les AG w6 : l'acide arachidonique (ALA), dont le précurseur est l'acide linoléique. L'ALA est un constituant majeur des membranes cellulaires, et un précurseur des médiateurs inflammatoires lipidiques (prostaglandines type 2, leucotriènes type 4). Cependant des doses excessives d'Oméga 6 sont déconseillées, l'important étant de garder un ratio Omega 6/Oméga 3 qui tend vers 5 (Figure 20 : Ratio Omega 6/Oméga 3 dans différentes populations [21]). Plusieurs études ont démontré que dans plusieurs pays, ce ratio se rapprochait de 20 ; cet excès d'apport en Oméga 6 provoque une situation pro inflammatoire et pro thrombotique, favorisant l'obésité, le diabète de type 2 et l'athérosclérose. L'excès d'oméga 6 fait basculer d'un état physiologique à un état pathologique [21].

Teneur en acide linoléique en g/100g d'aliment	Aliment
0,8-2	Beurre, œuf entier, beurre allégé
5-10	Huile d'olive vierge
10-20	Huile de noisette
20-30	Huile de colza
30-40	Margarine au tournesol
40-50	Huile de sésame
50-60	Huile de noix, de maïs, de soja
60-70	Huile de pépins de raisins, de tournesol

Figure 19 : Exemples d'aliments riche en acide linoléique [27]

Population	ω -6/ ω -3
Paleolithic	0.79
Greece prior to 1960	1.00-2.00
Current Japan	4.00
Current India, rural	5-6.1
Current UK and northern Europe	15.00
Current US	16.74
Current India, urban	38-50

Figure 20 : Ratio Omega 6/Oméga 3 dans différentes populations [21]

- Les **glycérides** sont composées d'une molécule de glycérol et d'une ou plusieurs molécules d'acides gras (ex : triacylglycérols : TAG). Ce sont des lipides alimentaires hydrophobes, leur rôle principal est énergétique. Ils constituent donc la réserve énergétique métabolique, qui se situe principalement au niveau du tissu adipeux [18].



Figure 21 : Structure chimique d'un TAG [18]

- Les **phosphoglycérolipides** et les **sphingolipides** sont des lipides amphiphiles ; ils ont donc un rôle structural. En effet, ils sont des constituants membranaires, assurant la fluidité

membranaire ainsi que le passage moléculaire et sont également responsables de la signalisation cellulaire [18].

- Les **stéroïdes**, dont le **cholestérol** est le chef de file, qui sont également des précurseurs de synthèse des hormones stéroïdiennes. Le cholestérol est apporté soit par l'alimentation, exclusivement via les produits animaux, soit grâce à une synthèse endogène de l'organisme. On distingue le HDL-cholestérol, du LDL-cholestérol. En effet ils sont liés à des protéines, les apolipoprotéines, ainsi qu'à des triglycérides et des vitamines liposolubles. Le LDL cholestérol est qualifié de « mauvais cholestérol », car lors de son transport sanguin il peut s'oxyder et former des dépôts au niveau des tissus. Contrairement à lui, le HDL-cholestérol est qualifié de « bon cholestérol », car il emmène le cholestérol oxydé des tissus vers le foie où il sera dégradé [22].

Chez le sportif, les lipides sont les substrats énergétiques utilisés pendant les efforts longs et modérés. Pour les efforts d'intensité élevée, il s'agit de limiter les apports en lipides afin d'augmenter la réserve en glucides. Pour une personne sédentaire, la consommation journalière recommandée de lipides, doit être comprise entre 35% et 45% de l'AET. Tandis que chez un sportif, la part des lipides doit représenter au maximum 35% de l'AET, afin de maximiser l'apport en glucides d'une part et d'apporter les AG essentiels d'autre part [23]. La quantité d'énergie fournie est de 9 kcal par gramme de lipides.

1.3.3 Les protéines

Les protéines font partie avec les lipides et les glucides des macronutriments nécessaires dans notre alimentation. Les protéines sont une succession d'acides aminés (AA), reliés entre eux par des liaisons peptidiques. Ce sont de grosses molécules, linéaires ou ramifiées et organisées dans l'espace ou non. Un acide aminé est une molécule composée d'un groupement carboxylique, d'une fonction amine et d'une chaîne latérale.

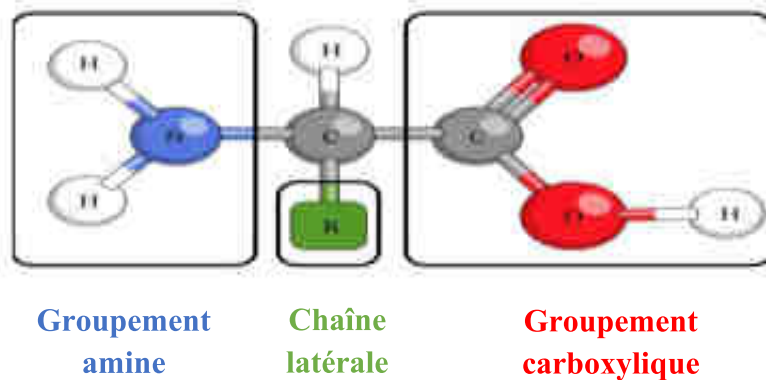


Figure 22 : Schéma de la structure chimique d'un acide aminé [24]

Il en existe vingt, que l'on peut diviser en deux groupes [24] :

- Les acides aminés non essentiels (n = 11), que notre corps produit ;
- Les acides aminés essentiels (n= 9), qui doivent être apportés par l'alimentation ;



Figure 23 : Classification des acides aminés essentiels et non essentiels

Les protéines ont plusieurs rôles au sein de notre organisme. Elles ont tout d'abord un rôle structurel, car elles constituent principalement le tissu musculaire (myosine, actine), osseux, les tissus conjonctifs (collagène) et le système sanguin (hémoglobine). Elles ont également un rôle métabolique ; en effet elles constituent les enzymes, les hormones, les récepteurs, les anticorps ou encore l'hémoglobine. Elles vont agir au niveau du système musculaire dans le mécanisme de la contraction par exemple, au niveau cellulaire dans la synthèse et la modification d'ADN, ou encore au niveau immunitaire en participant à la cascade de réactions de défense. Les protéines alimentaires sont l'unique source d'azote de l'organisme, cet azote étant nécessaire pour la synthèse de nombreuses protéines de l'organisme d'une part et d'autre part pour la synthèse de molécules azotées non protéiques (glutathion, créatine, acides nucléiques) [24]. Les protéines sont la dernière source d'énergie utilisable par l'organisme, après les glucides puis les lipides. Chez le sportif, les protéines sont donc plus utiles et efficaces à la réparation du muscle squelettique après l'effort [25].

On peut classer les protéines selon leurs origines :

- Les protéines animales : viande, poissons, produits laitiers, œufs
- Les protéines végétales : céréales, légumineuses

Cependant ces protéines alimentaires ne sont pas équivalentes qualitativement. En effet, la qualité nutritionnelle de l'apport protéique va dépendre de sa biodisponibilité, ainsi que de sa teneur en acides aminés dits « essentiels ». Tout d'abord, la biodisponibilité d'une protéine correspond à sa quantité disponible après digestion enzymatique et absorption. La biodisponibilité d'une protéine peut se mesurer grâce à sa digestibilité iléale, exprimée en % (Figure 24 : Mesure de la biodisponibilité d'une protéine grâce à sa digestibilité [25]). On constate que les protéines d'origine animale sont mieux absorbées que les protéines d'origine végétale [26].

Aliment	Digestibilité iléale (%)
Farine de blé (toast)	90.3
Farine de lupin	91.0
Isolat de soja	91.5
Protéines de pois	89.9
Protéines de colza	84.0
Ouf (cru/cuit)	51.3-90.9
Bœuf	94.3
Protéines de lait	95.0
Caseine	94.0-95.0

Figure 24 : Mesure de la biodisponibilité d'une protéine grâce à sa digestibilité [25]

Les protéines ne sont pas équivalentes quantitativement en acides aminés dit « essentiels ». En effet, ces acides aminés n'étant pas synthétisés par l'organisme, ils doivent être apportés en quantité suffisante. L'Indice Chimique d'une protéine correspond à sa capacité à satisfaire les besoins en AA « essentiels », pour un apport protéique moyen. Il concorde avec l'acide aminé ayant la plus faible valeur ; l'acide limitant. [26]

$$\text{Indice Chimique} = \frac{[\text{AA limitant}] (\text{mg/g protéine testée})}{[\text{même AA}] (\text{mg/g protéine de référence})} \times 100$$

Lorsque la valeur de l'Indice Chimique est supérieure à 100, cela signifie que le besoin nutritionnel protéique est comblé, c'est le cas des protéines animales. Au contraire, lorsque la valeur de l'Indice Chimique est inférieure à 100, le besoin nutritionnel en acides aminés essentiels n'est pas comblé ; c'est le cas de la lysine dans les céréales, tels que le blé, le riz et le maïs [26].

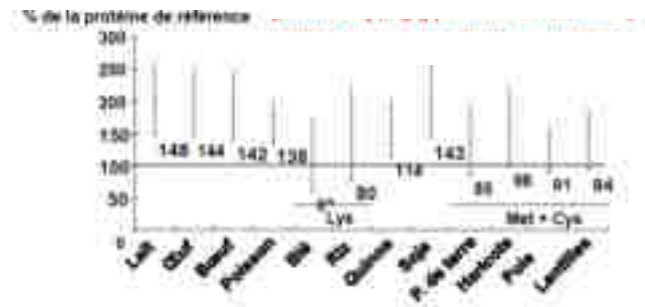


Figure 25 : Tableau de valeur de l'indice chimique en fonction des protéines [26]

En conclusion, l'apport de protéines d'origine animale n'entraîne aucune carence et remplit 100% des apports nutritionnels protéiques. En ce qui concerne les protéines végétales, il est conseillé de varier les différentes sources protéiques, ainsi que d'adapter les quantités afin qu'elles répondent aux besoins énergétiques.

Les recommandations actuelles de l'ANSES sont de consommer $0,83 \text{ g.kg}^{-1}.\text{jour}^{-1}$ pour une personne adulte sédentaire, soit 10 à 20 % de l'AET [25]. Chez le sportif d'endurance, les recommandations sont de consommer des protéines entre $1,2$ et $1,4 \text{ g.kg}^{-1}.\text{jour}^{-1}$, afin de réparer le tissu musculaire lésé après un effort. La quantité d'énergie fournie est de 4 kcal par gramme de protéines.

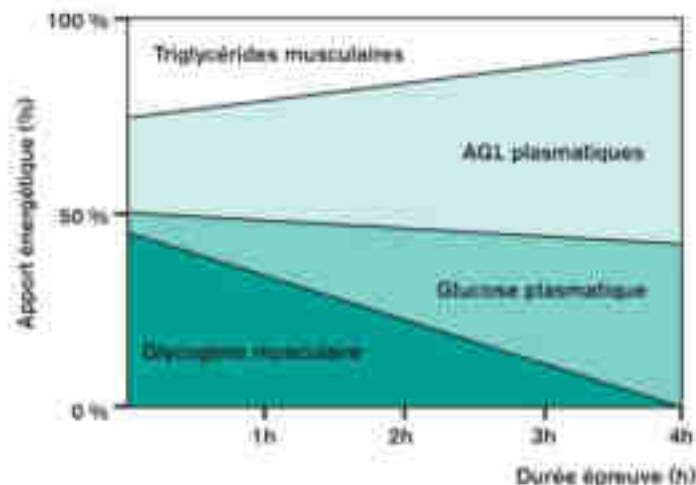
Aliment Teneur en protéines en g/100g d'aliment	Aliment
3,25	Blé dur
10,1	Lentilles vertes, cuites à l'eau
10,3	Œuf, blanc, cru
13	Lait entier UHT
13,5	Œuf entier, cuit à l'eau
16	Œuf, jaune, cuit
22,1	Saumon d'élevage, cuit au four
33	Bœuf cuit
32,1	Bœuf braisé
33,1	Poulet, filet, sans peau, sauté/poêlé
37,8	Soja, graines entières

Figure 26 : Exemples d'aliments riches en protéines [27]

2 Amélioration des performances par la nutrition

2.1 Utilisation des substrats endogènes : voies métaboliques impliquées

La nutrition du sportif en amont et durant une compétition est primordiale ; en effet l'organisme va créer de l'énergie à partir de ses réserves et des apports alimentaires reçus pendant l'effort. Plusieurs voies métaboliques sont impliquées dans la création d'énergie : chaque voie est spécifique d'un macronutriment, elle ne produit pas la même quantité d'énergie selon l'intensité et la durée de l'exercice.



Triglycérides musculaires : acides gras sous forme de glycérides, lipides en réserve au niveau des muscles

AGL plasmatiques (Acides Gras Libres plasmatiques) : lipides sous forme circulante

Glycogène musculaire : glucose en réserve au niveau des muscles

Glucose plasmatique : glucide sous forme circulante

Figure 27 : Origine des apports énergétiques en fonction de la durée d'un effort en endurance [29]

2.1.1 La glycolyse

Chez le sportif d'endurance, les glucides ont un rôle très important car ils sont le principal substrat permettant de créer de l'énergie. En effet, ils sont disponibles rapidement, pendant une longue durée et en grande quantité sous forme de glycogène, qui est stocké dans le foie et les muscles.

De ce fait, ils sont :

- Le substrat de choix lors d'exercices à intensités élevées,
- Nécessaires pour un exercice prolongé,

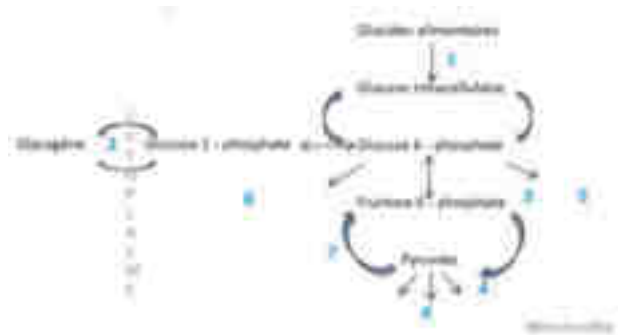


Figure 28 : Devenir des glucides alimentaires
[30]

Les glucides alimentaires sont absorbés au niveau du duodénum et du jéjunum sous forme de monosaccharides, grâce à un transport actif, via les transporteurs de type GLUT 1 à GLUT 5. Ils sont ensuite métabolisés au niveau du foie. Comme évoqué dans le paragraphe 1.3.1, ils peuvent :

- Être disponibles pour l'organisme sous forme de glucose circulant
- Être stockés sous forme de réserve : le glycogène

Lors d'un effort physique, l'organisme utilise les glucides disponibles sous forme circulante ou sous forme de réserve, afin de produire de l'énergie grâce à un enchaînement de plusieurs voies métaboliques. La **1ère étape** ou la 1^{ère} voie métabolique s'appelle la **glycolyse** ou la voie d'Emden Meyerhoff. Il s'agit d'une voie universelle d'assimilation du glucose qui a lieu dans le cytoplasme des cellules (du foie, des muscles squelettiques, du cerveau, ...).

La glycolyse est un enchaînement de réactions biochimiques, impliquant différentes molécules et coenzymes :

Molécule	Composition	Rôle
ATP (Adénosine Tri- Phosphate)	<ul style="list-style-type: none"> - 1 nucléotide, - 1 sucre, - 1 triphosphate 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisée par les cellules pour leur fonctionnement. • Produit de l'énergie : l'hydrolyse de l'ATP en ADP (adénosine diphosphate) et en phosphate libre de l'énergie, environ 31 KJ.mol^{-1}
NADH, H ⁺ (état réduit)	<ul style="list-style-type: none"> - 2 nucléotides (nicotinamide et adénine) - 2 sucres - 1 diphosphate 	<ul style="list-style-type: none"> • Interviennent comme coenzymes • Permettent de transporter les électrons, grâce à des réactions d'oxydoréductions. • La forme réduite permet la synthèse d'ATP
NAD ⁺ (état oxydé)		
FADH ₂ (état réduit)	<ul style="list-style-type: none"> - 2 nucléotides - 1 sucre - 1 diphosphate 	
FAD ⁺ (état oxydé)		

La glycolyse consiste en un enchaînement de réactions enzymatiques produisant deux molécules de pyruvate à partir d'une molécule de glucose. Le rôle principal de cette 1^{ère} étape est la production de pyruvate avec une faible production d'énergie sous forme d'ATP (Figure 29 : Représentation de la glycolyse aérobie [31]) [30].

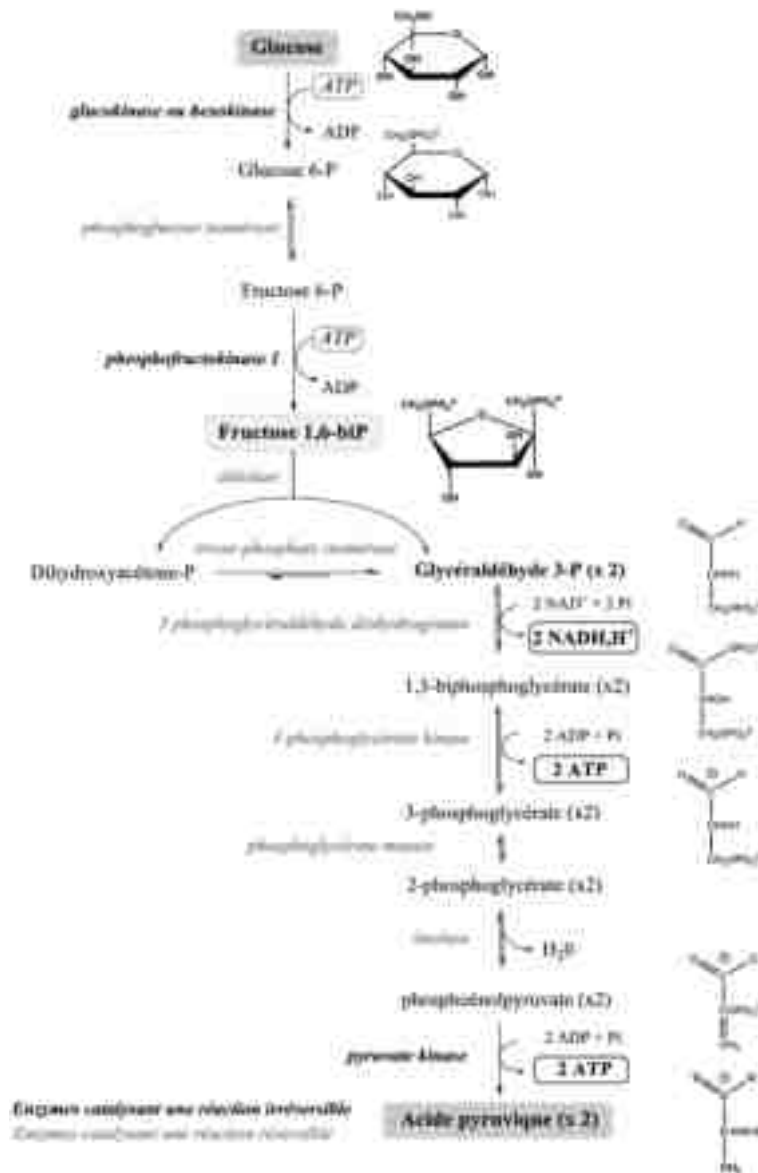


Figure 29 : Représentation de la glycolyse aérobie [31]

L'équation de la glycolyse est la suivante [30] :



Le pyruvate obtenu, à la fin de cette 1^{ère} étape peut ensuite être catabolisé par deux voies différentes, selon la présence ou non de dioxygène :

- En présence de dioxygène, la voie métabolique utilisée est la **glycolyse aérobie**,
- En l'absence de dioxygène, la voie métabolique utilisée est la **glycolyse anaérobie**

2.1.1.1 La glycolyse aérobie

En présence de dioxygène, la **2nde étape** de la production d'énergie à partir des glucides est le transport du pyruvate du cytoplasme dans la mitochondrie de la cellule. Ainsi, le pyruvate est transporté dans la mitochondrie de la cellule via un transporteur spécifique, la pyruvate translocase. Ce symport est coûteux en énergie : il consomme 2 ATP.

La **3^{ème} étape** de la production d'énergie à partir des glucides a donc lieu dans la mitochondrie, il s'agit du **cycle de Krebs**. Ce dernier consiste en une série de réactions biochimiques dont le rôle est de produire des intermédiaires énergétiques (FADH₂ et NADH, H⁺), qui plus tard synthétiseront de l'ATP. Le pyruvate présent dans la mitochondrie de la cellule est décarboxylé par un complexe enzymatique en Acétyl-Coenzyme A (usuellement appelé Acétyl-CoA). Cette dernière molécule est le point d'entrée du cycle de Krebs : il s'agit d'un important intermédiaire du métabolisme des glucides, lipides et protéines. Le cycle de Krebs se décompose en 8 réactions enzymatiques, générant 8 molécules différentes : le citrate, l'isocitrate, l'α-cétoglutarate, le succinyl coA, le fumarate, le malate et l'oxaloacétate [30].

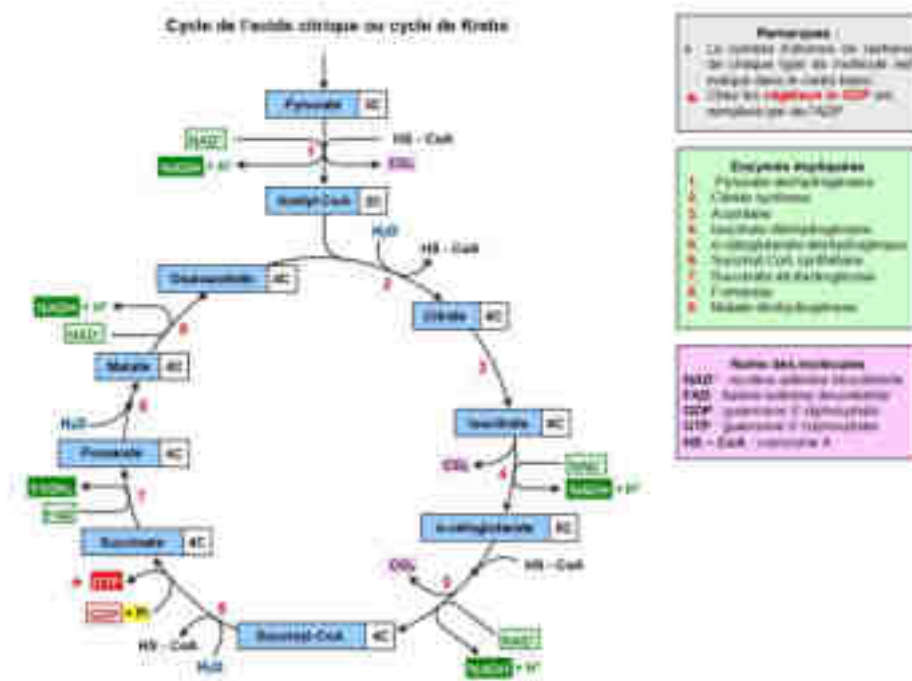
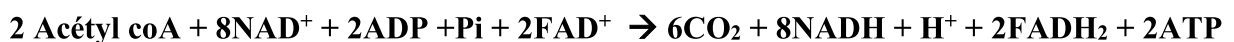


Figure 30 : Représentation du cycle de Krebs [32]

L'équation du cycle de Krebs est la suivante :



La 4^{ème} étape de la production d'énergie à partir des glucides est la **phosphorylation oxydative**, aussi appelée chaîne respiratoire. Elle a pour rôle la production d'énergie sous forme d'ATP, grâce à la régénération des coenzymes réduits (FADH₂ et NADH,H⁺). Cette étape a lieu dans la membrane interne mitochondriale.

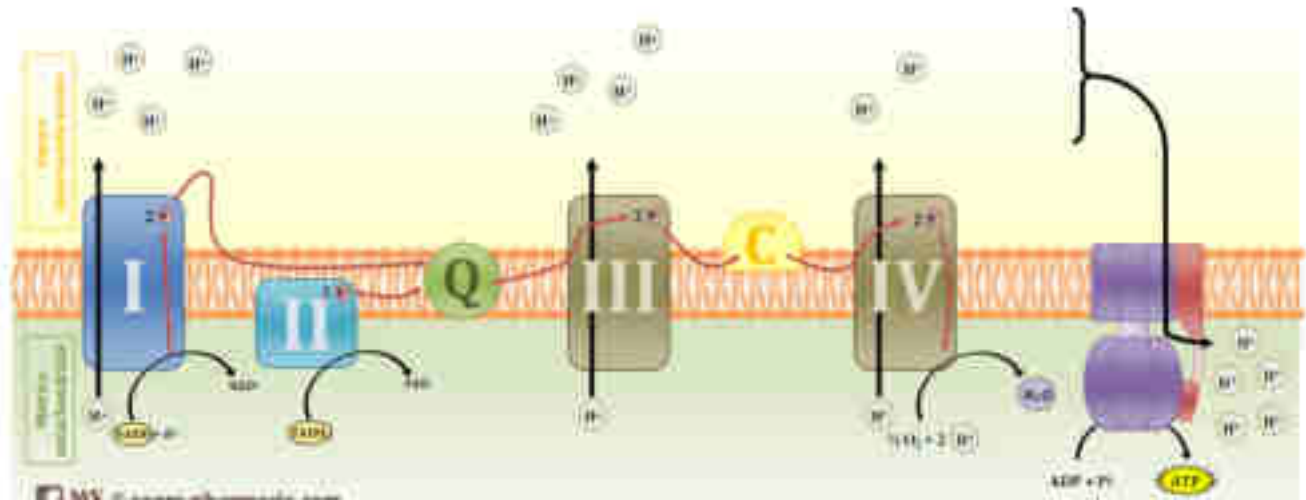
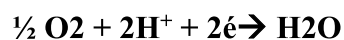


Figure 31 : Représentation de la phosphorylation oxydative dans la membrane interne mitochondriale [33]

Dans un premier temps, les cofacteurs NADH, H⁺ et FADH₂ vont être oxydés en NAD⁺ et FAD⁺ en libérant des protons et des électrons. Les protons vont être acheminés dans l'espace inter membranaire et créer un gradient positif. Les électrons, quant à eux, sont transportés dans la membrane jusqu'au dioxygène qui est l'accepteur final des électrons pour former une molécule d'eau, selon l'équation [30] :



Dans un second temps, les protons situés dans l'espace intermembranaire vont fournir de l'énergie au complexe protéique situé dans la membrane interne ; l'ATP synthase. Son rôle est de produire de l'énergie, sous forme d'ATP, selon l'équation suivante [30] :



Ainsi dans la phosphorylation oxydative, l'oxydation d'une molécule de NADH entraîne la production de 3 molécules d'ATP, tandis que l'oxydation d'une molécule de FADH entraîne la production de 2 molécules d'ATP.

Le bilan d'énergie de la **glycolyse aérobie** est détaillé ci-contre [30] :

	ATP	NADH	FADH ₂	
Étape 1	2 ATP	2 NADH		
Étape 2	- 2 ATP			
Étape 3	2 ATP	8 NADH	2 FADH ₂	
Étape 4				
=	2 ATP	30 ATP	4 ATP	36 ATP
TOTAL				

Ainsi, lors d'un exercice d'endurance l'une des principales sources d'énergie est le glucose, présent sous forme de glucose circulant et de glycogène. Dans le cas du glycogène, celui-ci est tout d'abord métabolisé en glucose, via la glycogénolyse. Le glucose va donc produire de l'énergie grâce à la glycolyse, au cycle de Krebs et à la phosphorylation oxydative [29].

2.1.2 Glycolyse anaérobie

La glycolyse aérobie permet de synthétiser une grande quantité d'ATP. Cependant en début d'effort ou dans le cas d'une intensité élevée, l'organisme du sportif manque d'oxygène. Dans ce cas de figure, le cycle de Krebs et la phosphorylation oxydative ne peuvent pas fonctionner. En l'absence de dioxygène, la voie métabolique empruntée par le glucose est la **glycolyse anaérobie**. La 1^{ère} étape de la glycolyse anaérobie reste inchangée par rapport à la glycolyse aérobie : la transformation du glucose en pyruvate se fait grâce à des enzymes fonctionnant très rapidement et ne nécessitant pas d'oxygène. La 2^{nde} étape de la glycolyse anaérobie se déroule dans le cytoplasme : le pyruvate est transformé en lactate grâce à la lactate déshydrogénase [30].

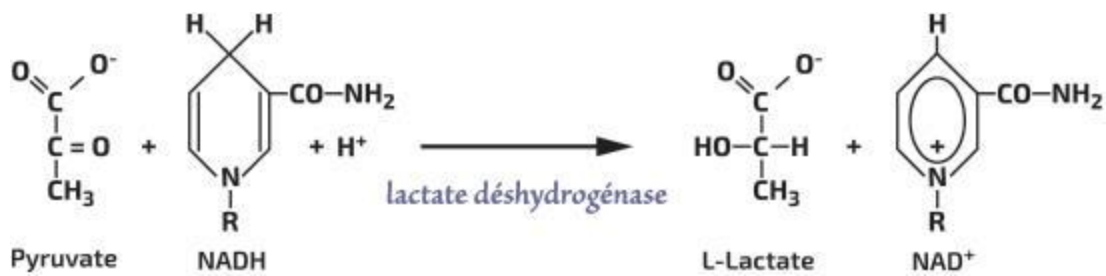
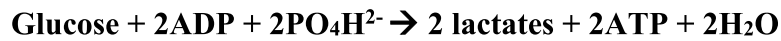


Figure 32 : Schéma de la réaction chimique de transformation du pyruvate en lactate [34]

L'équation de la glycolyse anaérobie est la suivante :



Le lactate ne faisant pas le cycle de Krebs, ni la phosphorylation oxydative, la production d'énergie sous forme d'ATP est bien moindre par rapport à la glycolyse aérobie et se résume selon le tableau ci-dessous [30] :

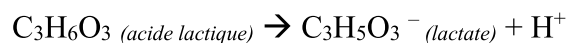
	ATP	NADH	TOTAL
Glycolyse (glucose → pyruvate)	2 ATP	2 NADH	8 ATP
Glycolyse anaérobie (pyruvate → lactate)		- 2 NADH	- 6 ATP
			2 ATP

Le lactate est le témoin de la production d'ATP ; en effet plus la concentration en lactate est élevée, plus important est le nombre de molécules d'ATP synthétisé et donc plus l'exercice musculaire est intense. La mesure de la lactatémie chez un sportif de haut niveau à différents instants de l'exercice permet donc de mesurer l'intensité de l'effort [35].

Le lactate formé va avoir plusieurs rôles :

- Les $\frac{3}{4}$ des lactates vont être oxydés pour produire de l'énergie :
 - Directement dans la mitochondrie de la cellule musculaire dans laquelle ils sont produits
 - Dans les cellules myocardiques et les fibres squelettiques peu sollicitées ou au repos, après avoir été transportés via les capillaires sanguins, grâce aux transporteurs Monocarboxylate Transporter (MCT)
- Le $\frac{1}{4}$ des lactates restant est utilisé comme précurseur de la gluconéogénèse (ou néoglucogénèse). En effet, le lactate est transformé en pyruvate, qui va être transporté jusqu'au foie, où il permettra la resynthèse du glucose [36].

On impute souvent au lactate la fatigue ainsi que les douleurs musculaires, telles que les courbatures et les crampes. Cependant, contrairement à ce qui a été communément admis, le lactate n'est pas responsable de l'apparition de douleurs musculaires, pouvant entraîner l'arrêt de l'activité, telles que les crampes et les courbatures. Le produit de la glycolyse anaérobie est le lactate et non d'acide lactique. L'équilibre entre ces deux molécules réside dans l'équilibre acido-basique suivant [35] :



Or au pH intramusculaire, situé entre 7,05 et 6,1, l'acide lactique a une constante de dissociation (pkA) de 3,86. D'après le diagramme de prédominance, la forme prédominante est la base, c'est-à-dire le lactate.

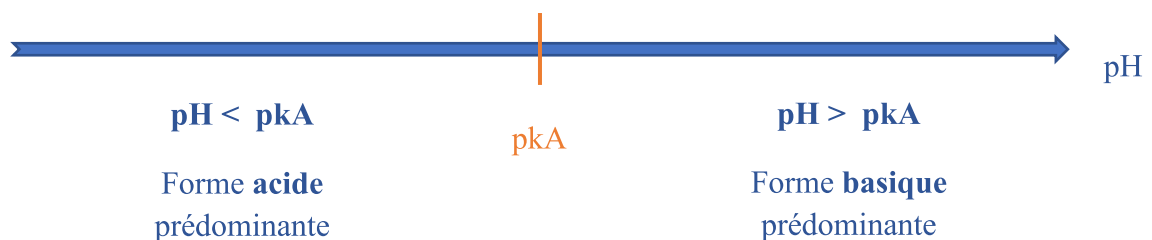


Figure 33 : Diagramme de prédominance de l'acide lactique

Le lactate n'est donc pas un déchet métabolique : il a un fort potentiel énergétique car il permet la synthèse d'ATP.

L'acidification du milieu intramusculaire serait à l'origine de la fatigue musculaire. En effet, lors de l'hydrolyse de l'ATP pour produire de l'énergie, un proton est relâché selon la réaction chimique suivante : $ATP^{2-} + H_2O \rightarrow ADP^- + Pi + H^+ + \text{Energie}$

Ce serait donc la libération de protons lors de la production d'énergie qui entrainerait une fatigue musculaire. Cependant après plusieurs hypothèses envisagées, le mécanisme précis de cette fatigue n'est pas connu. En ce qui concerne les crampes musculaires, la lactatémie n'est pas linéairement corrélée à l'apparition de crampes. Dans certaines disciplines, telles que le 400 mètres, le 800 mètres et le 1500 mètres, où la lactatémie peut atteindre 20 à 25 mmol.L⁻¹, aucune crampe n'est ressentie, tandis que dans d'autres disciplines telles que le football ou le marathon, à faible production de lactate, des crampes se font très souvent ressentir. Les crampes musculaires sont très probablement dues à une hyperexcitabilité neuromusculaire, liée à une déshydratation ou à des carences minérales. Les courbatures, quant à elles, ne seraient pas imputables au lactate, mais seraient en fait liées à des microdéchirures du tissu musculaire et périmusculaire qui entraînaient des douleurs musculaires retardées [36].

2.1.3 Oxydation des acides gras

Les lipides ont un rôle énergétique et structural. Ils sont stockés dans différents tissus [37] :

- Dans le foie : il synthétise et oxyde les lipides. Il va donc réguler la quantité d'acides gras libérée dans le sang, selon les besoins de l'organisme.
- Dans le tissu adipeux : il a un rôle de mise en réserve et de stockage principalement sous forme de triacylglycérols. Lors d'un besoin en acide gras par les tissus périphériques, la molécule de triacylglycérol est hydrolysée et les acides gras sont transportés dans le sang via l'albumine.
- Dans les tissus extra hépatiques (musculaire, cerveau) : ils sont stockés et utilisés sous forme de triacylglycérols.

La voie métabolique utilisée pour produire de l'énergie à partir des lipides est la β -oxydation, aussi appelée Hélice de Lynen. Il s'agit de la principale voie de dégradation des acides gras : elle se déroule dans la mitochondrie des cellules. Les acides gras doivent passer du cytosol de la cellule à sa mitochondrie en traversant la double membrane mitochondriale [37]. Les acides gras :

- À longue chaîne carbonée (tel que l'acide alpha-linolénique) sont activés en Acyl-coenzyme A, puis transestérifiés en Acylcarnitine.

- À courte et moyenne chaîne carbonée (tel que l'acide octanoïque) sont uniquement activés en Acyl-coenzyme A.

La première étape est l'**activation** de l'acide gras en Acyl-Coenzyme A, catalysée par l'Acyl-coA-synthétase :



La seconde étape consiste à l'**estérification** de l'acyl-CoA par la carnitine, grâce à trois enzymes différentes (Figure 32). La carnitine est une molécule hydrophile, de petite taille, qui permet à l'Acyl-CoA de traverser la double membrane mitochondriale. Tout d'abord, l'enzyme CPT1 (Carnitine Palmitoyl Transférase 1), située sur la membrane externe de la mitochondrie va catalyser le transfert du groupe Acyl sur la molécule de carnitine. Puis l'enzyme Carnitine Acylcarnitine Translocase (CAT) va transporter la molécule d'acyl-carnitine dans la mitochondrie en échange d'une molécule de carnitine. Pour finir, l'enzyme CPTII (Carnitine Acyl Transférase) va échanger la molécule de carnitine contre une molécule de Coenzyme A. La molécule d'acide gras est donc relâchée dans le cytosol sous forme d'acyl coA, qui pourra être oxydé [37].

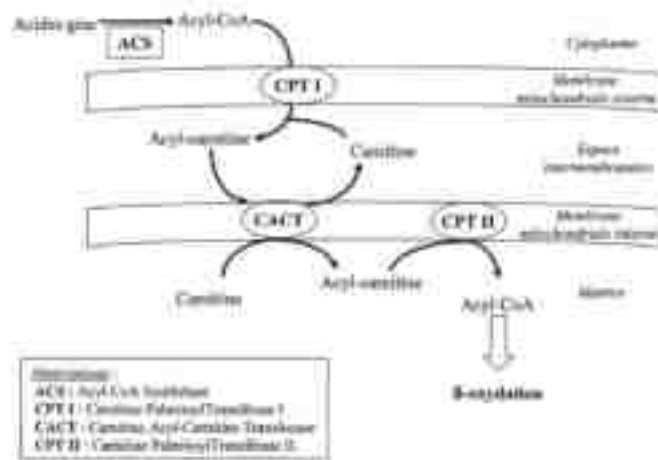


Figure 34 : Schéma du passage transmembranaire des Acides gras à longue chaîne carbonée [38]

Une fois la molécule d'Acyl-CoA dans la mitochondrie, celle-ci va pouvoir être oxydé dans l'hélice de Lynen. Cette hélice est composée de 4 enzymes qui vont catalyser la coupure de l'acide gras couplée au CoA, en une molécule d'Acétyl-coA et une molécule à *n-2 atomes de carbone* du même acide gras. L'objectif de la β -oxydation est donc de produire de l'énergie, grâce aux produits finaux :

- L'acétyl coA, via l'oxydation par le cycle de Krebs
- Les cofacteurs **NADH** et **FADH₂**, via la phosphorylation oxydative

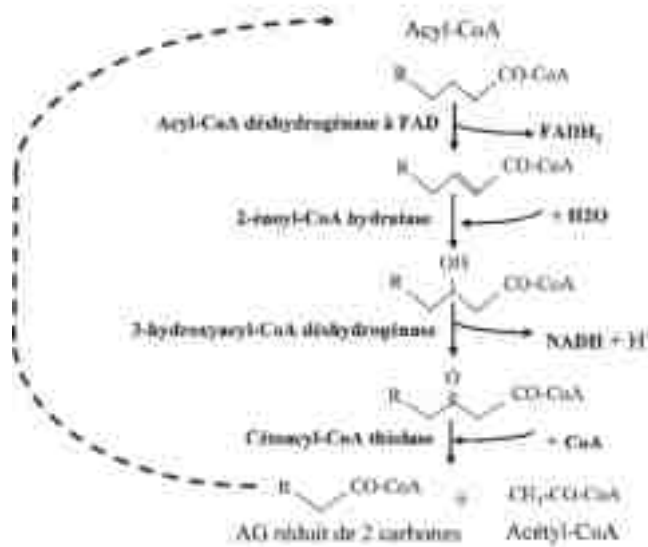


Figure 35 : Schéma de l'hélice de Lynen [38]

La β -oxydation permet de synthétiser un grand nombre d'ATP, grâce à la longue chaîne carbonée des acides gras. Ils sont donc une importante source d'énergie. L'exemple ci-contre synthétise le bilan énergétique de la dégradation de l'acide stéarique (C18:0) [37] :

	ATP	Acétyl CoA	FADH2	NADH	
Activation de l'AG	- 1ATP				
Hélice de Lynen		9 Actéyl-coA	8 FADH2	8 NADH	
TOTAL	- 1ATP	9 x 12 = 108 ATP	8 x 2 = 16 ATP	8 x 3 = 24 ATP	= 147 ATP

Les lipides produisent plus d'énergie sous forme d'ATP que les glucides, cependant leur réserve (tissus adipeux) n'est pas aussi rapidement mobilisable que la réserve de glucides (glycogène hépatique). C'est pourquoi les glucides sont utilisés lors d'effort de courte durée et que les lipides prennent le relais lorsque l'effort se prolonge. En ce qui concerne l'utilisation préférentielle des glucides lors d'exercices

à intensité élevée, l'explication demeure dans le passage des acides gras à travers la membrane mitochondriale (étape précédant la β -oxydation).

Il a été démontré que lors d'un exercice physique à intensité élevée, l'oxydation des acides gras par la β -oxydation est totalement inhibée au profit de l'utilisation des glucides par la glycolyse. C'est ce que l'on appelle le « cross-over point » (Figure 36 : Utilisation des glucides et des lipides (en %) en fonction de l'intensité de l'exercice [40]). En effet, on constate que l'utilisation des lipides est majoritaire entre 45% et 65% de la VO_{2max} . L'hypothèse la plus probable est que l'augmentation de l'intensité de l'exercice, accélérerait la glycolyse et ainsi augmenterait la concentration en pyruvate et en Acétyl-coA dans la mitochondrie. L'acétyl-coA accumulé serait alors tamponné par la carnitine, qui est essentielle au fonctionnement de l'enzyme CPT1. Celle-ci ne pourrait alors pas transporter les acides gras à longue chaîne carbonée dans l'espace inter membranaire de la mitochondrie. Les lipides sont donc le substrat de choix pour des exercices de longue durée à faible intensité, tandis que les glucides sont le substrat privilégié lors d'exercices de courte durée à intensité élevée [39].

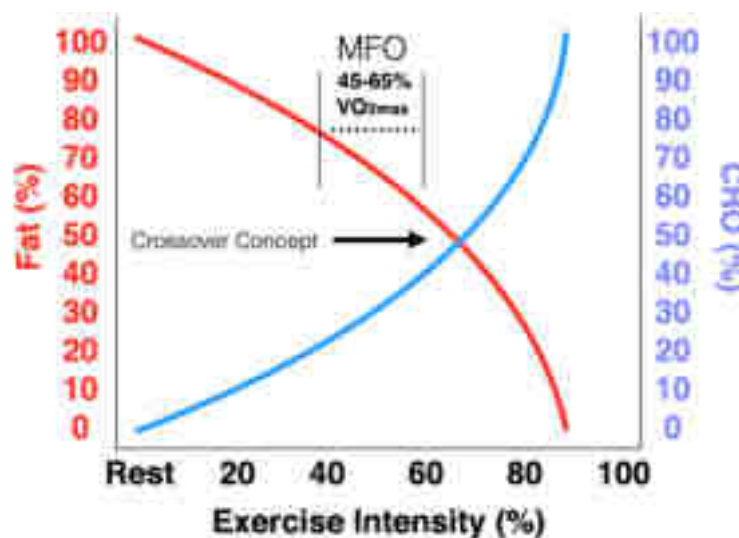


Figure 36 : Utilisation des glucides et des lipides (en %) en fonction de l'intensité de l'exercice [40]

Il peut être intéressant de maximiser la quantité d'acides gras oxydés, pour obtenir le plus d'énergie possible. Afin d'optimiser la β -oxydation, le sportif peut jouer sur plusieurs paramètres [40] :

- L'entraînement : plus un sujet est entraîné et plus grande sera la quantité d'acides gras oxydée. En effet, une étude menée chez des sujets modérément et hautement entraînés a montré une augmentation de l'oxydation maximale des acides gras, respectivement de 0,29 +/- 10 g/min chez

les sujets modérément entraînés à $0,47 \pm 17$ g/min chez les sujets hautement entraînés. Le statut d'entraînement influence l'oxydation maximale des acides gras en augmentant la concentration en triacylglycérols intramusculaires dans les fibres de type I. Ces fibres sont responsables de la contraction musculaire lors d'efforts peu puissants et prolongés.

- La durée : celle-ci influence le type de substrat endogène qui sera oxydé. En effet au-delà de 90 minutes d'effort la quantité intramusculaire de triacylglycérol commence à diminuer ; on observe alors une augmentation de la concentration plasmatique des acides gras à longue chaîne carbonée. Ces derniers proviennent du tissu adipeux. Puis au-delà de 120 minutes d'effort, ce sont principalement les acides gras sanguins à longue chaîne carbonée qui sont oxydés par le muscle.
- La nutrition : l'organisme consomme en priorité ce qui lui a été majoritairement apporté dans les 3 à 5 jours précédant l'exercice physique. Ainsi durant un régime riche en graisses, la concentration intramusculaire en triacylglycérol augmente tandis que celle du glycogène diminue. Ce régime va donc augmenter la quantité d'acides gras oxydée lors d'un exercice modéré (environ 65% VO₂max) et prolongé (environ 3 heures) ainsi qu'au repos ; cependant pour un effort intense (environ 75% de la VO₂max), seuls les glucides seront oxydés. La nutrition du sportif doit donc être adaptée au type d'entraînement pratiqué :
 - Une alimentation riche en lipides de façon ponctuelle, par exemple lors des périodes préparatoires hors saison avec un volume important et des intensités faibles à modérées.
 - Une alimentation riche en glucides lors des périodes de compétition avec des intensités élevées.

2.1.4 Oxydation des protéines

Lors de l'ingestion de protéines, ces dernières sont dégradées et hydrolysées dans l'estomac puis dans l'intestin grêle. Dans un premier temps, l'acidité de l'estomac permet de dénaturer la structure complexe des protéines afin d'obtenir des peptides. Dans un second temps, les enzymes pancréatiques (trypsine, chymotrypsine) ainsi que les enzymes intestinales (carboxypeptidase, aminopeptidase) hydrolysent les peptides en acides aminés libres qui sont absorbés au niveau du duodénum. Les acides aminés se trouvent ensuite dans la circulation sanguine, dans laquelle ils auront plusieurs devenir :

- La synthèse dite de novo de protéines de l'organisme
- Le renouvellement de protéines de l'organisme
- La production d'énergie

- L'élimination des acides aminés excédentaires via une molécule hydrosoluble, l'urée, qui va capter la molécule d'ammoniac (-NH₃) et être éliminée par la voie rénale et par la sueur

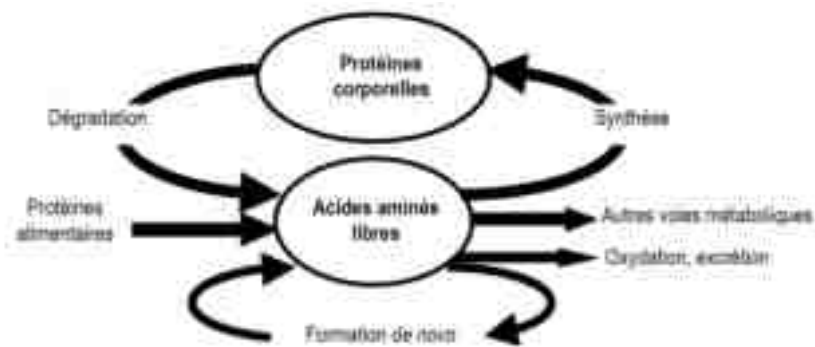


Figure 37 : Devenir des protéines alimentaires

À titre d'exemple, chez un homme adulte de 70 kg, le compartiment protéique correspond à un poids situé entre 10 et 12 kg, répartis suivant les catégories suivantes :

- 42 % dans le muscle squelettique,
- 15 % dans les tissus de structure (peau, os, sang)
- 10% dans les tissus viscéraux
- Le reste dans les autres tissus et les différents organes.

Ainsi que nous l'avons également vu dans le paragraphe 1.3.3, les protéines ont donc principalement un rôle structurel. Cependant, dans certaines situations elles peuvent également produire de l'énergie pour satisfaire la dépense énergétique. Lors d'un exercice d'endurance de longue durée ou encore lorsque les sources d'énergie prédominantes (glucides et lipides) sont épuisées, on observe une augmentation de l'oxydation des acides aminés branchés (leucine, isoleucine et valine).

On constate sur la Figure 38 qu'une déplétion en glycogène, hépatique et musculaire, entraîne une augmentation de la production d'urée, ce qui prouve qu'il y a une augmentation de l'utilisation des protéines afin de produire de l'énergie. De plus, il a été démontré qu'un apport régulier en glucose au cours d'un exercice physique diminuait de 20% l'oxydation de la leucine.

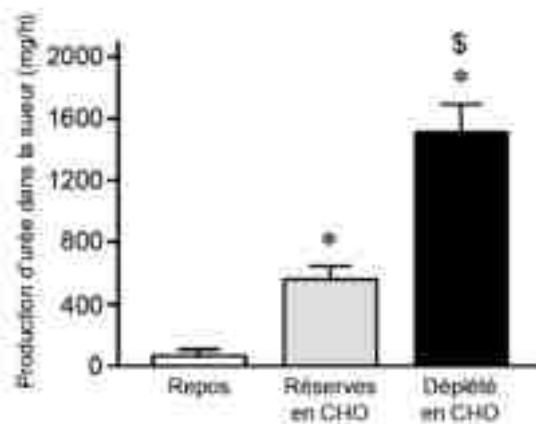


Figure 38 : Schéma de la production d'urée en fonction de la disponibilité en glucides de l'organisme

Ainsi l'utilisation des protéines durant un effort physique d'endurance est étroitement liée à la disponibilité des glucides et des lipides. Dans des conditions standards d'exercice, 1% à 6% de la dépense énergétique provient de l'oxydation des protéines.

La voie métabolique qui permet de produire de l'énergie à partir des protéines est la gluconéogénèse, aussi appelée néoglucogénèse.

Cette voie métabolique fonctionne en permanence, à intensité variable, au niveau du foie, des reins et des intestins. Elle permet de produire du glucose, lors d'une hypoglycémie par exemple, à partir de substrats non glucidiques :

- Les acides aminés (50%)
- Le lactate (42%)
- Le glycérol (8%)

L'objectif de cette voie métabolique est de produire du glucose, qui est ensuite métabolisé via la glycolyse, le cycle de Krebs et la phosphorylation oxydative, afin de produire de l'énergie.

2.2 S'alimenter en fonction des besoins de l'organisme du sportif

La nutrition d'un sportif lors de la préparation à un marathon a pour objectif d'optimiser l'apport d'énergie :

- Du début de la période d'entraînement au départ de la course
- Pendant la course,
- Pendant la période de récupération d'un entraînement ou de la course,

En effet, de nombreux facteurs contribuent à la performance à une épreuve, que ce soient des facteurs mécaniques, psychologiques, physiques ou encore nutritionnels.

2.2.1 Avant l'effort

L'alimentation durant la période d'entraînement (qui dure entre 8 et 12 semaines), si elle est optimisée, permet d'une part d'améliorer la qualité des séances d'entraînements, et d'autre part de limiter les effets néfastes de l'entraînement (troubles digestifs, dégradation des fibres musculaires entraînant la blessure, altération du système immunitaire). La pratique d'une activité physique de 1 heure à 3 heures par jour et ce à une fréquence de 3 à 4 séances par semaine augmente la dépense énergétique du sportif : les apports énergétiques du sportif doivent être qualitativement et quantitativement suffisants pour équilibrer la balance énergétique. L'équilibre alimentaire est une notion qui permet de s'assurer que l'alimentation apporte tous les nutriments dont un individu a besoin. Cet équilibre alimentaire repose sur deux critères : l'équilibre des différentes catégories d'aliments (viandes, légumes, fruits, graisses et les micronutriments), et l'équilibre et la variété des aliments au sein d'une même catégorie (variété de légumes, de fruits ou de féculents). Pour atteindre cet équilibre alimentaire, les recommandations actuelles sont de consommer quotidiennement :

- Des **fruits frais et de saison** (2 parts) : riches en minéraux et en vitamines, ils ont un IG bas.
- Des **légumes frais, surgelés ou en conserve** (3 parts) : riches en minéraux et en vitamines, ils ont un IG bas.
- Des **féculents** (3 parts) : riches en glucides. La taille de la part à adapter en fonction de la dépense énergétique.
- Des **graisses** et des **oléagineux** (3 à 4 parts) : privilégier les AGMI (huile d'olive, huile de colza, noisette) et les AGPI riches en ω -3 (huile de lin, lentilles, noix, pois cassés, haricots secs)

- Des **laitages** (0 à 2 parts) : privilégier les yaourts naturels, les produits frais fermentés (tel que les yaourts aux bifidobactéries ou lactobacilles), le fromage blanc à 0% MG et le lait demi-écrémé. Les produits laitiers sont riches en protéines, en calcium et en zinc. Si une personne ne consomme pas de laitages (par exemple dans le cas d'une intolérance au lactose), il est important d'augmenter la proportion d'aliments riches en calcium ; eaux enrichies en calcium, fruits secs, fruits séchés, lait de soja enrichi en calcium et des légumes.
- De la **viande, du poisson et des œufs** (3 à 4 parts par semaine) : ils sont riches en protéines, en fer, en zinc et en AGPI ω -3 (EPA et DHA). Il est préférable de favoriser les poissons gras tels que le saumon, le thon et la sardine.
- Les **épices, aromates et les herbes** (à volonté) : riches en anti-oxydants et en composés anti-inflammatoires.

Durant la période d'entraînement à un marathon, l'objectif d'un programme nutritionnel est d'avoir un apport optimal en micronutriments et en macronutriments, notamment en glucides. En effet, d'après la Figure 6 : Pourcentage de la VMA maintenue sur différentes distances en compétition [6], le marathon se court à une intensité comprise entre 75 % et 84 % de la VMA. Or d'après la Figure 36 : Utilisation des glucides et des lipides (en %) en fonction de l'intensité de l'exercice [40], les principaux macronutriments dont l'organisme a besoin sont les glucides. L'objectif d'avoir des apports importants en glucides est d'entraîner l'organisme à les utiliser, le plus efficacement et le plus rapidement possible, afin de produire de l'énergie (sous forme d'ATP). Le stockage et l'utilisation optimales des glucides permettent donc de retarder et de limiter au maximum l'apparition de la fatigue.

Pendant un programme d'entraînement, la nutrition est dépendante de deux critères [41] :

- Le type d'exercice : la durée et l'intensité de la séance d'entraînement vont influencer le substrat principalement oxydé ; savoir s'alimenter en fonction des caractéristiques de la séance à venir est donc important.
- La périodisation des apports glucidiques : l'objectif est de savoir utiliser les glucides ainsi que les lipides, une alternance de période pauvre et riche en glucides peut être bénéfique pour l'organisme.

Lors de la préparation à un marathon, le plan d'entraînement est composé de séances de fractionnés et de séances en endurance fondamentale. Comme vu précédemment, les glucides sont la principale source d'énergie, lors d'exercices à haute intensité et/ou pour des durées inférieures à 90 minutes. En amont d'une séance de fractionné à haute intensité ou d'une sortie en endurance fondamentale il est donc intéressant de faire le stock de glucides, sous forme de glycogène [43] :

- Le glycogène musculaire ; il est utilisé en 1^{er}. Celui-ci est épuisé en 90 minutes à 70% du VO2max. Des stocks suffisants de glycogène doivent donc être présents afin de mener à terme la séance d'entraînement et d'enchaîner les séquences d'intensité de la séance.

Les glucides sont donc le principal carburant pour l'organisme du sportif : ils permettent de limiter la fatigue et d'améliorer les performances.

Un sportif d'endurance doit consommer des lipides à hauteur de 35 % des AET, tandis qu'un non-sportif doit en consommer entre 35 % et 45 % des AET. Ces recommandations différentes reposent sur le fait qu'un sportif doit maximiser la prise de glucides afin de les stocker. Cependant pour des efforts de longue durée et en relais des glucides, les lipides sont également oxydés afin de produire de l'énergie. Il est possible d'entraîner l'organisme à oxyder les lipides lors d'un exercice, en s'entraînant immédiatement après un faible apport en glucide. C'est ce que l'on appelle la périodisation des apports glucidiques. Une étude a été menée sur l'impact de la périodisation des apports glucidiques sur la performance. Deux groupes de 11 triathlètes ont été entraînés avec le même plan d'entraînement pendant 6 semaines. Les 3 premières semaines, ils avaient un régime alimentaire commun et les 3 semaines suivantes, ils avaient un régime alimentaire différent [41] :

- Le groupe Test : ils ont adopté un régime de périodisation des apports glucidiques. Le 1^{er} jour, ils ont pris un déjeuner riche en glucides suivi d'un exercice à haute intensité (HIT) ; à la suite de cet exercice, ils ont pris un dîner pauvre en glucides. Le 2^{ème} jour ils ont pratiqué à jeun un exercice physique de faible intensité (LIT). Ce cycle était répété pendant trois semaines.
- Le groupe Contrôle : ils se sont entraînés avec un apport normal ou riche en glucides pendant trois semaines.

La quantité totale de glucides ingérée par jour est de 6 g/kg/jour dans les deux groupes, répartis entre les différents repas. Cette étude mesure la performance des deux groupes grâce à plusieurs tests réalisés en laboratoire. Les résultats de cette étude montrent qu'après 3 semaines de périodisation glucidique chez le groupe Test, les triathlètes ont amélioré :

- Le temps de course d'un 10 km de 3% (pré-étude : 40 minutes et 23 secondes / post-étude : 39 minutes et 2 secondes).
- Le temps d'effort lors une épreuve supra maximale de cyclisme. En effet, à une intensité correspondant à 150 % de la PMA et une cadence de 120 tours/minute, les triathlètes du groupe Test ont maintenu leur temps de travail plus longtemps à la fin de l'étude qu'au début (pré-étude : 52,7 secondes, post-étude : 57,8 secondes)

- La composition corporelle. En effet, la masse corporelle totale et la masse grasse corporelle ont significativement diminué chez le groupe Test.

Parmi ces critères, le groupe Contrôle n'a pas obtenu de résultats significatifs à la fin de l'étude [41].

La périodisation glucidique permet de stimuler et d'optimiser l'utilisation des acides gras. Lors d'un entraînement à faible intensité avec de faibles réserves glucidiques, l'oxydation des lipides ainsi que le pourcentage maximal d'oxydation des lipides augmentent. Un régime hyper-lipidique seul n'est pas efficace dans la préparation à un marathon, car il ne stimule aucune voie métabolique particulière. Bien au contraire, un entraînement ciblé en adéquation avec la nutrition permettra d'améliorer les performances.

Les protéines, quant à elles, sont la dernière source d'énergie mobilisable, après les glucides et les lipides. En effet, il n'existe pas de réserves protéiques dans l'organisme. Elles sont donc oxydées en dernier dans le muscle squelettique, lorsque les réserves en glycogène et en AGL plasmatiques sont épuisées. Cependant, chez un sportif, la dépense énergétique est plus importante que chez une personne sédentaire : les apports en protéines sont donc plus élevés. Pour un sportif d'endurance la consommation de protéines est supérieure à celle d'une personne sédentaire, c'est-à-dire entre 1,2 et 1,4 g.kg⁻¹.jour⁻¹. La part de production totale d'énergie à partir de l'oxydation des acides aminés va varier en fonction du type d'exercice, de son intensité, de sa durée, de l'entraînement et de la qualité de la ration alimentaire. Outre leur rôle de substrat, elles jouent un rôle structural : ce sont les molécules composants le tissu musculaire. Au repos, il existe un état d'équilibre entre la synthèse et la dégradation musculaire : les protéines composants le tissu musculaire sont dégradées et remplacées par les protéines synthétisées à partir d'acides aminés libres. Lors d'un exercice d'endurance, on observe une modification du métabolisme protéique au sein du muscle squelettique, avec une augmentation de la protéolyse et une diminution de la protéosynthèse. Pendant un effort prolongé, l'objectif est d'augmenter la concentration d'acides aminés libres qui peuvent être de véritables substrats énergétiques. Cette balance en faveur d'un catabolisme protéique musculaire serait à l'origine des douleurs et des lésions musculaires. Les acides aminés utilisés par le muscle pour la protéosynthèse et pour produire de l'énergie, sont les acides aminés essentiels branchés (BCAA) suivants ; la valine, l'isoleucine et la leucine. Une supplémentation en acides aminés avant un effort peut-elle entraîner une amélioration des performances ? On peut supposer qu'une supplémentation en acides aminés apporterait de l'énergie et diminuerait les dommages musculaires liés à l'activité. L'ingestion de protéines avant un effort a été peu étudiée ; certaines études contradictoires et peu convaincantes ont montré que l'ingestion de protéines avant l'entraînement améliorerait les performances. Mais, dans ces études, l'ingestion d'acides aminés dans des produits de

supplémentation était accompagnée d'autres nutriments (tels que les glucides), ce qui rend les résultats difficilement interprétables [7].

Il n'existe à ce jour aucune étude avec des preuves suffisantes affirmant que cet apport :

- Augmente la quantité d'énergie disponible pour l'effort
- Diminue les lésions musculaires, en favorisant la synthèse musculaire.

Un plan de nutrition optimal lors de la période d'entraînement est donné en Annexe 1 : il regroupe plusieurs idées de menus, les quantités de glucides et de protéines pour chaque repas, et ceux pour deux personnes de poids différents (50 et 70 kg).

Outre le fait d'apporter plus de glucides à l'alimentation et de périodiser les apports glucidiques au cours de l'entraînement, il est important de consommer des aliments qui seront digérés lors de l'entraînement. En effet, la séance ne doit pas être perturbée par des troubles digestifs. La période d'entraînement a également pour objectif de tester différentes stratégies alimentaires en vue du marathon.

Temps de séjour gastrique	Aliments
1 à 2 heures	Eau, thé, café, riz, œufs mollets ou à la coque, poisson cuit
2 à 3 heures	Lait, thé ou café au lait, pommes de terre, pâtes, pain blanc, omelettes ou œufs brouillés
3 à 4 heures	Pain noir, frites, carottes, chou, concombre, épinards, radis, jambon, volaille cuite, steak
4 à 5 heures	Lentilles, petits pois, haricots verts, bœuf, viandes fumées, fromage
5 à 7 heures	Champignons, viande rôties, hareng, lard
7 à 9 heures	Sardines à l'huile

Figure 39 : Tableau du temps de séjour gastrique de différents aliments

Ainsi il est nécessaire d'avoir une alimentation en adéquation avec la séance d'entraînement. Cette dernière peut avoir lieu le matin, à midi ou en soirée : le dernier repas doit être pris 3 heures avant l'effort et être digeste. Cependant dans certains cas de figures, l'emploi du temps ne permet pas de réunir les conditions optimales pour réaliser un entraînement.

Il existe quelques solutions pour gérer ces situations particulières :

- Entraînement le matin à jeun :
 - La séance doit être pratiquée après avoir bien dormi et en étant reposé.
 - La séance ne doit pas dépasser une heure et rester à une intensité modérée.
 - Il est indispensable d'avoir fait la veille un repas équilibré et riche en glucides afin de débiter la séance avec un stock de glycogène suffisant.
 - Après l'entraînement, la ration de récupération est fondamentale et doit se composer d'un petit déjeuner riche en glucides et en protéines, afin de compenser le risque d'altération des fibres musculaires lié à l'utilisation des protéines comme source d'énergie.
- Entraînement à midi :
 - Si le petit déjeuner remonte à moins de 4 heures, aucun aliment n'est indispensable avant l'entraînement, à condition que le petit déjeuner soit de qualité (riche en glucide à IG bas) et suffisant en quantité.
 - Si le petit-déjeuner remonte à plus de 4 heures ou qu'il était insuffisant, il convient de prendre un en-cas 2 heures avant l'entraînement (barre de céréales, fruits frais, fruits secs ou yaourt)
 - Le déjeuner qui suit est un repas de récupération : il devra être riche en glucides et équilibré.
- Entraînement le soir :
 - Le repas de midi doit être de qualité (IG bas), varié et équilibré.
 - Il convient de prendre un en-cas 2 heures avant la séance (barre de céréales, fruits frais, fruits secs ou yaourt)
 - Le dîner qui suit est un repas de récupération : il devra donc être riche en glucides et équilibré.

A l'approche du marathon, l'équilibre alimentaire du coureur de fond doit être légèrement modifié. Pendant les 3 jours précédents la course, l'alimentation doit être chargée en glucides et composée d'aliments digestes pour éviter l'inconfort intestinal. On a constaté chez un sportif très entraîné qu'une alimentation hyper-glucidique, c'est à dire de 700 à 800 g/jour de glucides pendant 3 jours, a permis d'augmenter de 90% les réserves en glycogène musculaire. Cette surcharge glucidique dans les 3 jours précédents le marathon a-t-elle un impact positif sur l'endurance ? De nombreuses études ont démontré que le niveau initial des réserves glycogéniques n'influence pas la performance pour des efforts intenses d'une durée inférieure à 90 minutes. Cependant la majorité des études mettent en évidence une amélioration des performances, pour des efforts d'une durée supérieure à 90 minutes,

lors d'un régime enrichi en glucides. Le principal moyen permettant d'optimiser les performances lors d'un marathon est d'augmenter le niveau des apports glucidiques durant les 3 jours précédents le marathon. Cette surconsommation de glucides entraîne une amélioration de la performance chronométrique de 3% à 4%. Il est donc recommandé dans les 3 à 4 jours précédents une compétition, de réduire l'entraînement et de suivre un régime hyper-glucidique (environ 10 à 12 g/kg/jour), dans le but de saturer les réserves en glycogène [43].

Afin d'optimiser ce régime hyper-glucidique, il est judicieux :

- D'éviter au maximum les fibres qui favorisent la satiété et qui peuvent provoquer des troubles gastro-intestinaux.
- De consommer des glucides à IG faible.
- De consommer 3 repas et 2 collations au long de la journée, plutôt que d'augmenter la taille des repas.
- De ne pas tester de nouveaux aliments ou menus.

Ce régime hyperglucidique peut entraîner une prise de poids, pouvant aller jusqu'à 2 kg : il est donc conseillé de tester le régime hyper glucidique en amont d'une compétition importante.

Exemple d'une journée de charge en glucides (10-11 g/kg de poids corporel, pour un sportif de 70 kg) :

Petit déjeuner					
½ baguette (125 g) Confiture (60 g)	1 bol de céréales (60 g)	1 bol de lait demi-écrémé (250 ml)	1 jus de fruits (200 ml)		
Collation					
1 banane	1 yaourt à boire (200 ml)				
Déjeuner					
Pâtes (300 g)	Carottes (150 g)	Blanc de poulet (125 g)	1 fruit frais (200 g)	¼ baguette	Eau
Goûter					
2 barres de céréales (40 g)	1 yaourt à boire (800 ml)				

Dîner					
Riz (300 g)	Courgettes (150 g)	Cabillaud (125 g)	Compote (100 g)	1/3 baguette	Eau
Collation du soir					
1/3 baguette					

Le dernier repas pris avant la course est très important pour le coureur. Le repas d'avant course suit les mêmes règles que le plan de nutrition durant les 3 jours précédant le marathon.

Il est conseillé de :

- Limiter les apports en lipides, en fibres et en di- et oligosaccharides, afin de favoriser la prise de glucides et de limiter l'apparition de troubles gastro-intestinaux.
- Favoriser au maximum la prise de glucides et un apport modéré en protéines (à l'exception de la viande rouge, qui est riche en AG saturés et difficile à digérer).
- Consommer le dernier repas au minimum trois heures avant l'effort ; si ce délai est réduit, l'apport calorique devra également être plus faible, afin d'avoir une meilleure digestibilité.
- Consommer des glucides jusqu'à une heure avant le départ d'une course, particulièrement si le sportif n'a pas assez mangé lors du dernier repas ou si le stress consomme beaucoup d'énergie.

Cas d'une course le matin : exemple de petit déjeuner :

Athlète de 55 kg	Athlète de 70 kg
100 g de pain au levain, beurre	125 g de pain au levain, beurre
1 yaourt nature 0% de matière grasse, 20 g de miel	1 yaourt nature 0 % de matière grasse, 20 g de miel
200 g de compote de pomme	200 g de compote de pomme
1 thé vert	1 thé vert
<u>TOTAL</u> : 105 g de glucides + 15 g de protéines	<u>TOTAL</u> : 125 g de glucides + 17 g de protéines

Cas d'une course l'après-midi : exemple de déjeuner :

Athlète de 55 kg	Athlète de 70 kg
80 g de riz (pesé cru), 1 œuf mollet	100 g de riz (pesé cru), 1 œuf mollet
1 yaourt nature 0% MG, 15 g de miel	1 yaourt nature 0 % MG, 15 g de miel
1 banane	1 banane
<u>TOTAL</u> : 100 g de glucides + 13 g de protéines	<u>TOTAL</u> : 120 g de glucides + 14 g de protéines

Après avoir consommé son dernier repas, il est conseillé au sportif de consommer une boisson dite d'attente ou une collation, riche en glucides. Il est recommandé dans le laps de temps d'une à trois heures avant l'effort de consommer environ 1 à 2 g/kg de glucides à index glycémique faible. La consommation préférentielle de glucides à index glycémique faible a un impact sur la fatigue ; celle-ci apparaît plus tardivement. En effet, la consommation de glucides à index glycémique élevé dans l'heure précédent la course entraîne un pic glycémique suivie d'une sécrétion d'insuline et donc d'une hypoglycémie réactionnelle [29]. Celle-ci entraîne de la fatigue, une baisse de la vigilance et de la concentration : il est donc important de s'alimenter correctement et de s'hydrater dans les 3 dernières heures avant le marathon.

Exemple de collations :

Collation
1 barre énergétique
1 yaourt à boire
200 g de compote
300 ml de jus de raisin
Une boisson d'attente à 20-30 g/L de glucides

2.2.2 Pendant l'effort

Le marathon entraîne une dépense énergétique de 750 à 1500 kcal/heure, selon l'allure de course, soit une augmentation de la dépense énergétique de base de 2500 à 3 000 kcal [29]. S'il n'y a pas d'ingestion d'aliments pendant la course le sportif peut avoir une hypoglycémie, dont les symptômes sont les suivants :

- Sensation de malaise (nervosité, tremblements, pâleur, vertiges)
- Sueurs profondes
- Nausées, vomissements
- Sensation de faim anormale

Il est donc important de s'alimenter pendant la course afin d'éviter l'hypoglycémie et de retarder au maximum l'apparition de la fatigue. Ce sont les glucides qui doivent être préférentiellement ingérés pendant le marathon : en effet, ces derniers ont un rendement énergétique élevé et sont utilisables à différentes intensités. Ils ont plusieurs avantages, tels que [43] :

- L'épargne du glycogène musculaire
- L'apport d'un substrat musculaire exogène
- Un moyen de prévention de l'hypoglycémie
- L'activation des centres de récompense dans le SNC

Il a été démontré qu'au-delà d'un effort de 90 minutes, il est nécessaire d'ingérer des glucides à IG élevé pendant la course. Les effets de l'ingestion de glucides avant le marathon sur la performance sont plus importants si ces apports sont suivis par des apports glucidiques pendant la course. Dans le cas d'une compétition type marathon, l'apport glucidique doit être compris entre 60 et 80 g/h, sous forme liquide de préférence (boisson d'efforts) ou solide (barres, gels, purée, fruits secs). L'ingestion de boisson énergétique a pour avantage d'hydrater et de nourrir le coureur simultanément. D'après les recommandations, les boissons d'efforts doivent être consommées à une fréquence de 230 ml à 350 ml toutes les 10 à 15 minutes, à une concentration comprise entre 6% et 8% de glucides [29]. La majorité des études a montré que l'ingestion de glucides durant un effort avait un effet bénéfique sur la performance. Une étude menée par l'équipe de Coyle a même démontré que l'ingestion de glucides durant un effort mené à 70% de la VO₂max jusqu'à épuisement, engendrait un allongement de la durée de course d'environ 1 heure [7]. Une autre étude a été menée chez douze participants. Ils devaient pratiquer du vélo pendant 2 heures à 77% de la VO₂max suivi d'un contre-la-montre de 20 km, tout en

ingérant différentes quantités de glucose : 15, 30 et 60 g/h. Les résultats de cette étude montrent que l'augmentation de la quantité de glucose ingéré, entraîne une augmentation de l'oxydation des glucides et ainsi une amélioration des performances. De même il a été démontré dans une étude menée par Fielding et ses collègues que lorsqu'une dose de glucides était ingérée toutes les 30 minutes lors d'un exercice cycliste de 4 heures, les performances étaient améliorées par rapport à une ingestion de glucides toutes les 60 minutes. Ainsi, l'oxydation des glucides et la production d'énergie est optimale si l'apport est fractionné [43].

La tolérance et la capacité à oxyder les glucides exogènes vont dépendre de facteurs individuels tels que la vidange gastrique, le transit intestinal et l'absorption des nutriments, en réponse au stress lié à l'effort. Il a été prouvé que l'absorption d'une quantité importante de glucides pendant l'effort, y compris de façon fractionnée, était peu réalisée par les athlètes, qu'ils soient professionnels ou amateurs. En effet, les sportifs ingèrent environ 30g/h de glucides, une quantité inférieure aux 60 g/h recommandées : cette faible quantité est liée aux problèmes gastro-intestinaux durant la course. Afin d'améliorer la tolérance digestive et augmenter la quantité totale de glucides ingérée, il est conseillé d'avoir un apport mixte de glucides, sous forme d'un mélange de glucose/fructose. En effet, ces deux glucides ne sont pas absorbés de la même manière au niveau de l'intestin grêle [7] :

- Le co-transporteur sodium-glucose **SGLT1** absorbe le glucose
- Le transporteur **GLUT5** absorbe le fructose

Ce mélange de glucides permet d'augmenter la quantité totale de glucides absorbés par l'intestin et oxydés par le muscle.

Les troubles gastro-intestinaux liés à l'effort ont été rapportés chez 50% à 60 % des coureurs : ils sont multifactoriels et résultent d'une hypo perfusion sanguine de l'appareil digestif, d'une accélération de la motricité intestinale ou encore d'une augmentation de la perméabilité intestinale. Afin d'éviter au maximum l'apparition de ces troubles, quelques conseils pratiques doivent être respectés [44] :

- Aucun aliment ne doit être testé le jour de la course : que ce soient les boissons d'effort ou les barres, gels et autres aliments solides, ceux-ci doivent être testés en entraînement en amont de la course.
- Les symptômes gastro-intestinaux n'apparaissant qu'après 2 heures de course, le sportif peut habituer l'appareil digestif durant ses entraînements à s'alimenter.
- La boisson d'effort peut être composée de différents glucides dans des proportions différentes et à des concentrations différentes ; par exemple du glucose seul ou un mélange de glucose-fructose.

- Pour avoir l'apport glucidique en quantité suffisante et améliorer la tolérance digestive, commencer par augmenter le volume de la boisson d'effort ingéré, puis augmenter la concentration en glucides de cette même boisson.
- Consommer des aliments solides est optionnel pour un marathon, la boisson d'effort étant suffisante. Cependant si le besoin d'aliment solide se fait ressentir, il est possible de consommer des :
 - Barres énergétiques : composée de glucides à IG élevé, elle a pour inconvénient une mauvaise digestibilité et donc une mauvaise assimilation des glucides par l'organisme. Elle ne doit pas contenir de lipides, car cela empirerait la digestibilité.
 - Gels énergétiques : ils apportent une quantité importante de glucides à IG élevé, mais ne contiennent pas de minéraux et de vitamines. Le gel doit être consommé en même temps qu'un certain volume d'eau (200-300 ml), afin d'éviter les troubles gastro-intestinaux, car ils sont très concentrés.
 - Fruits secs, banane, orange : ils sont souvent proposés sur des ravitaillements en course. Ils présentent l'avantage d'être riche en potassium et en magnésium. Cependant leurs IG est trop faible pour l'effort fourni et ils restent pauvre en sodium.

Les recommandations sont de consommer 30 à 60 g/h de glucides. En prenant en compte un apport liquide et solide, cela correspond en pratique à :

- **30 g de glucides :**
 - 500 ml de boisson d'effort à 60 g/L
 - Ou 1 gel et 200 ml de boisson de l'effort à 60 g/L
 - Ou 1 banane
- **50 g de glucides :**
 - 800 ml de boisson à 60 g/L
 - Ou 600 ml de boisson à 80 g/L
 - Ou 1 gel et 500 ml de boisson à 60 g/L
 - Ou 1 banane et 350 ml de boisson à 60 g/L
- **60 g de glucides :**
 - 800 ml de boisson d'effort à 80 g/L
 - Ou 1 L de boisson d'effort à 60 g/L

- Ou 1 gel et 500 ml de boisson à 80 g/L
- Ou 1 barre énergétique et 500 ml de boisson à 80 g/L
- Ou 1 gel et 600 ml de boisson à 60 g/L
- Ou 2 gels et 250 ml de boisson à 60 g/L

Exemple de la composition de boisson d'effort (durée de l'effort > 1h 30) :

Ambiance tempérée (> 15°C)	Ambiance froide (< 15°C)
Concentration en glucides : 20 à 40 g/L	Concentration en glucides : 40 à 60 g/L
<i>Pour une concentration en glucides de 20 g/L</i>	<i>Pour une concentration en glucides de 60 g/L</i>
<u>Dans une bouteille de 1 litre :</u> <ul style="list-style-type: none"> - 1 verre de jus de raisin (150 ml) - 1 pincée de sel (1 g) - Eau (850 ml) 	<u>Dans une bouteille de 1 litre :</u> <ul style="list-style-type: none"> - 2 briques de jus de raisin (400 ml) - 1 pincée de sel (1 g) - Eau (600 ml)

Exemples de recettes de gels énergétiques maison :

<u>Recette N°1 :</u> <ul style="list-style-type: none"> - 30 g de sirop de riz - 30 g de miel - 40 ml de jus d'agrumes - 1 cuillère à soupe de curcuma en poudre 	<u>Recette N°2 :</u> <ul style="list-style-type: none"> - 20 g de sirop d'agave - 20 g de sirop d'érable - 20 g de marmelade d'oranges - 40 ml d'infusion de thym
<u>Recette N°3 :</u> <ul style="list-style-type: none"> - 30 g de sirop de bouleau - 30 g de sucre complet - 40 ml de jus de pomme 	

Exemple de recettes de barre énergétique maison :

- 50 g d'amande entières
- 50 g de noisettes
- 50 g de noix de cajou
- 50 g de dattes séchées
- 50 g de baies de goji
- 50 g de raisins secs
- 2 cuillères à soupe d'huile de coco
- 1 cuillère à soupe de noix de coco en poudre
- 1 cuillère à soupe de graines de sésame

2.2.3 En récupération

La période de récupération d'un sportif est un élément clé dans la stratégie nutritionnelle pendant la période d'entraînement à un marathon. Après une sortie longue réalisée en endurance fondamentale ou d'une séance à intensité élevée, il est important de soigner sa récupération, afin de pouvoir enchaîner avec les séances de fractionné à venir. Après un effort prolongé, les réserves de glycogène musculaire et hépatique sont épuisées. Il faut donc reconstituer le stock de glycogène, grâce notamment à l'apport de composés glucidiques [43]. Cet apport à la fin de la séance a plusieurs conséquences :

- L'accélération de la vitesse de resynthèse du glycogène
- Une augmentation des taux de glycogène au-dessus des valeurs préalables à la course

L'objectif nutritionnel post-course est donc de maximiser la restauration du glycogène musculaire pour récupérer le plus efficacement et le plus rapidement possible, afin de pouvoir réaliser des efforts successifs plusieurs jours de suite. Pour cela, il est donc important de consommer des glucides immédiatement après l'effort. Une étude a démontré que la restauration du glycogène musculaire était 50 % plus rapide et plus complète lorsque les glucides étaient administrés 30 minutes après un effort en comparaison à 2 heures après ce même effort. En effet, plus l'ingestion de glucides est rapide et plus la quantité de glucides synthétisée est élevée : on parle de **fenêtre métabolique**. Plusieurs stratégies nutritionnelles équivalentes en termes d'efficacité peuvent être appliquées [43] :

- L'ingestion de 0,6 à 1,0 g/kg de glucides dans les 30 premières minutes suivant l'arrêt de l'exercice, puis toutes les 2 heures pendant 6 heures.
- L'ingestion de 1,2 g/kg de glucides toutes les 30 minutes pendant 4 heures.

La vitesse de resynthèse du glycogène musculaire va dépendre du type de glucides consommés. En effet, on a observé que cette resynthèse était plus rapide lorsque du glucose ou des polymères de glucose étaient ingérés. Le fructose, à l'inverse, ne permet pas une resynthèse rapide du glycogène musculaire. Lors de la récupération, il est donc préférable de consommer des aliments à Index Glycémique élevé, tels que des bananes, des dattes ou un gâteau de riz [29].

Immédiatement après un effort prolongé et intense, il est donc recommandé de consommer jusqu'à 1,2 g/kg de glucides, afin de maximiser la synthèse de glycogène. En complément des glucides, plusieurs études ont montré que l'adjonction de protéines, entre 0,2 et 0,4 g/kg, était bénéfique pour la récupération. En effet, la combinaison de glucides et de protéines est une stratégie nutritionnelle connue chez le sportif d'endurance et qui permet notamment [44] :

- Une augmentation de la vitesse de resynthèse de glycogène
- La réparation des fibres musculaires
- De promouvoir un bilan azoté positif

L'intérêt d'un rechargement rapide des réserves en glycogène est d'optimiser la récupération ainsi que les performances futures. Une étude menée par Restad et son équipe a montré que l'ingestion de protéines (0,4g/kg/h) en complément de glucides (0,8g/kg/h) entraînait une augmentation significative des performances le lendemain d'un effort, par rapport à l'ingestion de glucides seuls [43]. Selon une autre étude, la restauration des réserves en glycogène 4 heures après un effort (épreuve de cyclisme à 65% de la VO₂max), était de 46 %, lorsqu'un mélange de glucides et de protéines (80g de glucides et 28g de protéines) était ingéré 30 minutes et 120 minutes après l'arrêt de l'effort. En comparaison, la restauration des réserves en glycogène était de 31% lors d'une supplémentation en glucides uniquement (108g de glucides). La cause de cette amélioration des performances lors d'une supplémentation en protéines reste hypothétique ; il pourrait s'agir d'un simple apport calorique supplémentaire ou d'une meilleure utilisation des glucides, notamment via une augmentation de la sécrétion d'insuline grâce à l'apport d'acides aminés insulino-sécréteurs. Cependant toutes les études ne sont pas unanimes, et certaines montrent que lorsque la quantité de glucides ingérée en post-course est suffisante (c'est à dire 1,2g/kg/h) et que la fréquence de la prise alimentaire est régulière, les protéines ne sont pas nécessaires à la nutrition durant la récupération d'un effort. En effet, les protéines sont particulièrement avantageuses durant les 40 minutes suivant l'arrêt de l'effort. Il est maintenant communément admis que l'importance de la co-ingestion de glucides et de protéines est moindre lorsqu'une quantité adéquate de glucides a été consommée pendant la course ou lorsqu'une récupération rapide n'est pas vraiment nécessaire [7].

À la fin d'une séance intense d'entraînement ou d'une sortie longue, il est important de manger pour améliorer la récupération ; il peut être intéressant de manger des aliments solides après avoir majoritairement consommé des boissons, car cela améliore la digestibilité. L'organisme a puisé dans ses réserves, il n'est alors pas rare de ressentir une sensation de faim dans les jours qui suivent. Il peut alors être intéressant de privilégier les féculents et les protéines [28].

Exemple de ration de récupération après un entraînement, pour un adulte de 70 kg :

- **500 ml de boisson de récupération contenant 70 g de glucides et 20 g de protéines**
- **80 g de céréales (muesli au fruit), avec 300 ml de lait ou lait de soja**
- **350 ml de milkshake à la banane (350 ml de lait de soja /lait demi-écrémé mixé avec une banane – 150 g – et 40 g de figues séchées)**
- **250 ml d'eau riche en bicarbonates, 200 ml de jus de fruit frais, 75 g de pain complet et un yaourt**
- **500 ml d'eau riche en bicarbonates, 75 g de pain complet, 10 g de confiture, 1 yaourt, 50 g de fruits secs**
- **1 portion de fruit (20 g de glucides), 1 produit laitier (15 g de glucides), des glucides complexes (20 g de protéines et 35 g de glucides)**

1 portion de fruits	1 produit laitier	Glucides complexes
<ul style="list-style-type: none"> - 1 banane - 4 abricots - 2 kiwis - 1 compote - 1 verre de jus de fruit 	<ul style="list-style-type: none"> - 1 verre de lait demi-écrémé - 1 yaourt sucré - 2 petits suisses à 20 % MG + 10 g de sucre - 1 fromage blanc à 20 % MG + 10 g de sucre 	<ul style="list-style-type: none"> - 1 tranche de pain d'épice - 1 barre de céréales aux fruits - 1 tranche de pain + miel

Aliments à privilégier après le marathon :

	Féculents	Fruits	Produits laitiers	Viande, poisson, œufs	Légumes/Huile
À privilégier	Pâtes, riz, pomme de terre	Fruit frais, salade de fruit, compote	Laitage, type yaourt sucré	Poulet, dinde, veau, bœuf,	Crudité, légumes cuits, huile de colza
À éviter	Friture	Beignets de fruits	Fromage	Saucisse, merguez, panure, viande en sauce	

2.3 L'hydratation

2.3.1 Rôle de l'hydratation

La stratégie nutritionnelle de préparation à un marathon est un levier complémentaire à un plan d'entraînement rigoureux et bien suivi. En adéquation à une alimentation adaptée au cours de la préparation à la course, une hydratation optimale est requise afin d'éviter l'épuisement mental et physique, ainsi que les malaises liés à une dérégulation hydrique.

Le corps humain est majoritairement composé d'eau, 60% à 65% de la masse corporelle. Les muscles quant à eux, contiennent environ 75% d'eau [44]. L'eau est donc essentielle à l'organisme, que ce soit pour un maintien en bonne santé, pour la croissance, la concentration mentale ou encore la régulation thermique. La balance hydrique de l'organisme, c'est-à-dire l'équilibre entre les apports et les pertes en eau, doit être optimale :

- **Apports hydriques :**

- Internes : par le métabolisme (0,3 L à 0,5 L/jour)
- Externes : par les boissons et l'alimentation (1 à 2 L/jour)

- **Pertes hydriques :**

- Rénale : l'organe filtre le sang et élimine les déchets métaboliques par les urines. Le rein régule le volume en eau de l'organisme ; il va donc permettre de lutter contre une éventuelle hyperhydratation ou une déshydratation.

- Respiratoire : l'air inspiré doit être réchauffé et humidifié. L'air expiré sera donc saturé en eau (environ 0,5 L/jour).
- Cutanée : la sueur est produite par les glandes sudoripares, qui permettent d'évacuer la chaleur et de réguler la température corporelle. La production de sueur est dépendante de l'exercice physique ; celle-ci augmente lors d'un effort physique en fonction de sa durée et de son intensité.

L'être humain a besoin de maintenir une température corporelle autour de 37°C. Lors d'un effort physique, celle-ci va augmenter de manière proportionnelle à la durée et à la puissance de l'exercice ; ainsi la production de chaleur à l'effort est de 15 à 20 fois supérieure à la production de chaleur des muscles au repos. La production de chaleur pendant un exercice varie de 4500 à 5000 kJ/h. Si cette chaleur était stockée, la température corporelle augmenterait de 1° C toutes les 5 à 7 minutes. Il est donc nécessaire d'avoir un procédé de régulation thermique pendant l'exercice musculaire ; il s'agit de la thermorégulation. Durant l'exercice, l'organisme va devoir évacuer la chaleur produite pour éviter cette franche augmentation de la température corporelle [7]. Pour cela, deux mécanismes de thermolyse se mettent en place :

- Le transfert de la chaleur produite par les muscles vers la surface cutanée, par convection via le sang. Au niveau de la surface cutanée, il y a une vasodilatation des capillaires sous cutanés et une augmentation du débit sanguin.
- L'élimination de la chaleur vers le milieu extérieur, sous forme de sueur.

Pour un exercice soutenu, il y a une production de sueur d'environ 0,5 à 2 L/h, celle-ci étant composée en majeure partie de sodium (1,5 à 4 g/L). Cette variabilité du volume d'eau perdu est dépendante de [7]:

- La nature de l'exercice
- De l'état d'entraînement physique : plus un sportif est entraîné et plus bas sera le seuil de déclenchement de la sudation, afin de stocker le moins de chaleur possible.
- Des facteurs climatiques (humidité de l'air, vitesse du vent, température extérieure)
- Des vêtements portés

La sudation est donc le moyen thermolytique le plus efficace, même si elle est coûteuse en liquide et en électrolyte pour l'organisme. Les pertes sudorales se mesurent en évaluant la variation de la masse corporelle lors de l'effort : celle-ci reflète la perte en eau de l'organisme. On considère que 1 kg de perte de masse corporelle correspond à 1 kg de perte sudorale. On inclut dans le calcul des pertes hydriques,

les apports lors de l'effort, ainsi que les pertes urinaires. Ainsi, on évalue le niveau de déshydratation d'un athlète, grâce à la réduction du poids corporel [45].

L'évaluation de l'état hydrique de l'organisme d'une personne peut se mesurer via des marqueurs sanguins et urinaires. Actuellement la mesure de l'aspect des urines est la méthode la plus couramment utilisée : la clarté ainsi que la quantité importante des urines est un indicateur de bonne hydratation [45].

Lors d'un exercice physique le sportif va majorer ses pertes en eau : le risque principal chez le coureur est donc la déshydratation. Elle correspond à un déséquilibre entre les entrées et les sorties d'eau. Les conséquences physiologiques de la déshydratation sont une diminution du volume sanguin et une augmentation de la fréquence cardiaque, tandis que les conséquences physiques sont une apparition précoce de la survenue de la fatigue. Le principal symptôme de la déshydratation est le sentiment de soif même s'il reste un signe tardif : en effet lors de son apparition, la déshydratation intracellulaire et extracellulaire est déjà présente et avancée. Une déshydratation peut entraîner une contre-performance : une perte de plus de 2% de la masse corporelle (soit 1,5 kg à 2 kg chez une personne de 75kg) entraîne une diminution de 20% du rendement physique. Cela s'explique notamment par une augmentation de la fréquence cardiaque et de la température interne. Ainsi, la déshydratation n'entraîne pas de réduction de la force musculaire, cependant elle entraîne une diminution de l'endurance et donc de la durée de l'exercice. L'altération des performances d'endurance est proportionnelle au niveau de déshydratation exprimée en pourcentage de la perte de masse corporelle. De plus, la déshydratation altère également les capacités cognitives : la mémoire à court terme ainsi que la mémoire de travail se dégradent, tandis que le temps nécessaire à la prise de décision augmente.

Parmi les accidents nécessitant un arrêt de course, on retrouve également le coup de chaleur d'exercice. Celui-ci se produit dans des conditions gênant la thermolyse (absence de vent, climat chaud, soleil trop important, port de vêtements non respirants) ou lors d'un effort intense et prolongé, lorsque la température corporelle dépasse les 39°C. Le coup de chaleur survient généralement chez des sujets jeunes, sans antécédents connus. Les symptômes sont :

- Une fatigue intense,
- Des vertiges,
- Des crampes musculaires,
- Une soif intense,
- Des nausées et des vomissements
- Une confusion
- Des troubles du comportement.

L'évolution du coup de chaleur peut être spontanément résolutive, mais dans certains cas elle nécessite la mise en œuvre de mesures de refroidissement et de réhydratation.

À l'opposé du syndrome de déshydratation, on retrouve notamment l'hyperhydratation : il s'agit d'un phénomène beaucoup moins connu du grand public. Cet état survient généralement chez des coureurs, non entraînés pour la plupart. Une étude réalisée lors du marathon de la baie du Mont Saint Michel chez 643 coureurs a montré qu'après avoir mesuré leurs masses corporelles au départ et à l'arrivée de la course, on a constaté une prise de poids chez 9,5% des coureurs. Cette prise de masse corporelle correspond à une hyperhydratation, dont les conséquences sont une hyponatrémie et une dilution du plasma, pouvant engendrer un œdème cérébral responsable de maux de tête, avec un risque de convulsions, voir dans les cas les plus sévères de coma. Afin de mieux comprendre le lien entre l'hyperhydratation et l'hyponatrémie, une étude a été menée à l'arrivée du Marathon de Boston, où 511 coureurs se sont soumis à une prise de sang [46].

Les résultats de cette étude montrent que :

- 13% des coureurs étaient en hyponatrémie
- L'hyponatrémie est associée à une prise de poids allant de 0,1 kg à 4 kg
- L'hyponatrémie est en lien avec une consommation liquidienne supérieure à 3 litres pendant le marathon, à une durée de course supérieure à 4 heures, au sexe féminin et à un faible IMC.

2.3.2 Une hydratation réussie

L'hydratation du sportif joue un rôle tout aussi important que la nutrition et ne doit donc pas être négligée. L'hydratation du marathonien va dépendre de plusieurs facteurs tels que : les conditions environnementales, le type d'effort, sa durée, ainsi que la physiologie individuelle de chaque athlète. De manière quotidienne, un sportif doit consommer entre 1,5 L et 2 L d'eau par jour, et encore plus s'il y a une production d'un effort intense et de longue durée ou en cas de forte chaleur. Il existe différentes sortes d'eau ; faiblement ou très minéralisées, bicarbonatées ou non, ainsi que riches en divers minéraux. Les eaux possèdent diverses propriétés ; certaines seront à privilégier en fonction de leurs compositions et des besoins spécifiques des individus. La recommandation d'une eau spécifique se fera en fonction des caractéristiques individuelles de chaque marathonien, en tenant compte du contexte médical (hypertension, traitement particulier, troubles digestifs) et du contexte non médical (alimentation quotidienne, activités sportives). Par exemple, lors de l'hydratation journalière, il est préférable de consommer une eau faiblement minéralisée afin d'optimiser la balance hydrique (équilibre entre les

apports et les sorties d'eau). Quotidiennement, il est important de consommer une quantité suffisante d'eau, en suivant un plan d'hydratation tel que le suivant [45] :

- Au réveil : 2 verres d'eau (30cl)
- Au petit-déjeuner : 1 verre d'eau (15 cl)
- Dans la matinée : ½ bouteille d'eau (50 cl)
- Au déjeuner : 2 à 3 verres d'eau (30 à 45 cl)
- Dans l'après-midi : ½ bouteille d'eau (50cl)
- Au dîner : 2 à 3 verres d'eau (30 à 45 cl)
- En soirée : 2 verres d'eau (30 cl)

Caractéristiques particulières	Exemples d'eaux minérales	Vertus thérapeutiques
Très faiblement minéralisées	Mont Roucous [®] Montcalm [®]	<ul style="list-style-type: none"> • Peu diurétiques, • Hydratation en profondeur
Faiblement minéralisées	Volvic [®] Valvert [®] Evian [®] Thonon [®] Perrier [®]	<ul style="list-style-type: none"> • Diurétiques
Très minéralisées	Contrex [®] Courmayeur [®] Hépar [®] Rozana [®] Saint-Yorre [®] Vichy Célestins [®]	<ul style="list-style-type: none"> • Reminéralisantes • Alcalinisantes, favorisant l'équilibre acido-basique • Digestives (stimulant les sécrétions pancréatiques et biliaires)
Bicarbonatées calciques	Perrier [®] Salvetat [®] Badoit [®] Quézac [®] Rozana [®]	<ul style="list-style-type: none"> • Alcalinisantes, favorisant l'équilibre acido-basique

Caractéristiques particulières	Exemples d'eaux minérales	Vertus thérapeutiques
Bicarbonatées sodiques, chlorurées sodiques	Saint-Yorre® Vichy Célestins®	<ul style="list-style-type: none"> • Alcalinisantes, favorisant l'équilibre acido-basique • Digestives (stimulant les sécrétions pancréatiques et biliaires)
Sulfatées magnésiennes, calciques	Vittel® Hépar® Courmayeur® Contrex®	<ul style="list-style-type: none"> • Laxatives • Diurétiques

Figure 40: Tableau des propriétés des différentes eaux

Afin d'optimiser l'hydratation, il est bon de savoir que la soif n'est pas un bon indicateur de l'état hydrique de l'organisme. En effet, lorsque la sensation se fait ressentir, un état de déshydratation est déjà présent. Il faut donc boire avant de ressentir la sensation de soif [45]. On distingue trois phases pendant lesquelles la stratégie d'hydratation sera différente :

- La période de préparation : l'objectif de cette étape est de commencer la course dans un état dit de « normo hydratation ». Pour atteindre cet état, il est important de consommer une boisson d'attente pendant les 15 minutes à 3 heures précédant la course. Cette boisson doit être composée d'un mélange de glucides complexes, en faible concentration, environ 20-30 g/L, ainsi que d'une série d'électrolytes tels que le sodium, le potassium, le fer, et le magnésium, qui sont tous des composants de la sueur. Il est conseillé de boire durant cette phase d'attente environ 500 ml [47].
- Pendant l'effort : l'objectif de cette étape est de compenser les pertes sudorales liées à l'effort et d'apporter des glucides pour compenser la dépense énergétique. Les boissons d'exercices permettent d'apporter des glucides tout en maintenant un équilibre hydrominéral. En effet, lorsque l'effort est supérieur à 1 heure, il est fortement conseillé d'apporter des glucides dans la boisson ainsi que des électrolytes tels que le sodium (500 à 700 mg/L) et du potassium (120 à 125 mg/L). Il est recommandé pour une course telle que le marathon de consommer une boisson d'exercice contenant 5 % à 6 % de glucides simples et complexes (50-60 g/L). De plus, la dilution des boissons d'exercices doit être adaptée aux conditions climatiques : plus il fait chaud et plus la boisson doit être diluée, jusqu'à 2% à 3% (20-30 g/L) [29]. Il faut éviter de consommer des

quantités trop importantes de liquides : mieux vaut consommer de petits volumes à des fréquences rapprochées afin d'éviter les problèmes gastro-intestinaux. Il est conseillé d'avoir un apport de 500 ml/h, soit environ 1 à 2 gorgées toutes les 10 minutes. La disponibilité des glucides dans le plasma va dépendre du volume ingéré, de la vitesse de vidange gastrique, de la concentration en glucides de la boisson, ainsi que de son osmolarité [47]. L'osmolarité (ou tonicité) d'une boisson correspond à son nombre de molécules : une boisson de sport doit être hypotonique ou isotonique, mais surtout pas hypertonique. Une boisson isotonique aura la même concentration que le sang, c'est-à-dire qu'elle sera facilement absorbée au niveau de l'estomac et ne provoquera pas d'inconfort digestif, contrairement à une boisson hypertonique qui est trop concentrée et tardera à quitter l'estomac. Cela favorise la déshydratation et les douleurs gastro-intestinales. Une boisson hypotonique est moins bien absorbée qu'une boisson isotonique, mais l'est mieux qu'une boisson hypertonique.

- La période de récupération : dans les conditions idéales où l'hydratation aurait été suivie pendant la course selon les recommandations, la quantité de liquide ingérée ne compense que 50% des pertes hydriques. Il est donc important de s'hydrater après l'effort, grâce à une boisson de récupération. Tout comme la nutrition, l'hydratation doit se mettre en place dans les 30 minutes qui suivent l'arrêt d'un effort physique. La boisson de récupération doit être composée de glucides simples associés à des protéines, selon un ratio 4 :1. Lors d'un effort constant et de longue durée, tel que le marathon, le pH sanguin s'abaisse et devient acide. Ce déséquilibre acido-basique peut entraîner l'apparition de crampes et de douleurs musculaires. Il peut être intéressant de consommer des eaux riches en bicarbonates (telles que les eaux gazeuses Perrier® et Rozana®) afin d'éliminer les toxines et de neutraliser l'acidité liée à l'effort [47]. Si lors de l'effort une quantité importante de sels minéraux a été perdue par la sueur, la consommation d'une eau reminéralisante telle que Vichy® est intéressante [28]. Ces boissons sont à consommer de préférence en période de récupération, car la prise de boissons riches en bicarbonates avant le marathon peut entraîner l'apparition de troubles gastro-intestinaux.

Phase de l'effort	Apports hydriques	Apports glucidiques	Apports électrolytiques	Autres apports
Avant (15 min à 3 h avant) : Préparation	50-75 ml/15 min, soit 400-600ml/2-3 heures (coloration des urines, mesure du poids)	20-30 g/L dextrose < fructose + maltodextrine	Sodium, magnésium, fer, manganèse, calcium	Caféines ou dérivés Vitamines B, C, D3
Pendant l'effort (à partir de 60 à 90 minutes d'effort) : Maximisation	500-1000 ml/heure (boire avant d'avoir soif)	Environ 30-80 g/L dextrose + fructose + maltodextrine	500-700 mg/L sodium + 120-225 mg/L potassium + calcium, manganèse, phosphore	Vitamines B (B1)
Après (30-45 minutes après l'effort) : Récupération	1,5 x le poids perdu pendant la course (coloration des urines, mesure du poids)	Environ 20-60 g/L dextrose < fructose	Eau bicarbonatée gazeuse (Badoit, Vichy, St-Yorre)	Protéines (environ 0,2 mg/kg/h) BCAA, glutamine, arginine Lait (500 ml dès que possible) Vitamines, antioxydants (500 ml)

Figure 41 : Tableau du plan d'hydratation optimal d'un adulte [47]

La consommation d'alcool chez le sportif n'est pas conseillée ; il s'agit de réduire cette consommation à proximité des entraînements, car l'alcool [45] :

- Favorise la déshydratation
- Augmente le risque de blessure
- Diminue les capacités physiques et mentales
- Ralentit la resynthèse du glycogène musculaire
- Perturbe la qualité du sommeil : l'alcool favorise l'endormissement, mais perturbe la qualité du sommeil profond
- Perturbe les mécanismes de régénération musculaire et osseuse en période de récupération

Afin de ne pas perturber l'hydratation du sportif, quelques conseils sur la consommation d'alcool sont à prendre en compte [45] :

- Consommer 1 verre/jour maximum chez la femme et 2 verres/jour maximum chez l'homme
- Des effets néfastes jusqu'à 2 jours après une consommation excessive d'alcool peuvent avoir lieu sur l'entraînement
- Consommer de préférence des boissons avec une faible teneur en alcool (bière, cidre, cocktails avec peu d'alcool)
- Boire beaucoup d'eau dans les heures suivant la consommation d'alcool

3 Micronutrition : quelle place lui donner dans l'alimentation du sportif ?

3.1 Définitions générales

La micronutrition consiste à optimiser les besoins en micronutriments de l'organisme grâce à une alimentation saine, diversifiée et individualisée, associée ou non à une complémentation. Sont considérés comme micronutriments les vitamines, les sels minéraux, les oligoéléments, les acides gras essentiels (EPA, DHA et ALA) et les acides aminés essentiels (leucine, isoleucine, lysine, méthionine, phénylalanine, thréonine, valine, tryptophane, histidine).

Les sels minéraux, les oligoéléments ainsi que les vitamines sont des molécules organiques, devant être présentes en quantité suffisante dans une alimentation saine et équilibrée. Elles n'ont pas de valeur énergétique, mais assurent des fonctions vitales au sein de l'organisme. Les vitamines sont des molécules impliquées dans de nombreux processus biologiques. On distingue deux grandes familles de vitamines ; les vitamines hydrosolubles et les vitamines liposolubles [48]. Parmi les composés minéraux on différencie les sels minéraux des oligoéléments. Les sels minéraux sont présents en grand quantité dans l'organisme. Il s'agit notamment du sodium, du potassium, du magnésium, du calcium, du chlore, du phosphore et du soufre. Les oligo-éléments sont présents en faible quantité dans l'organisme. Il s'agit entre autres, du chrome, du fer, du fluor, de l'iode, du cuivre, du manganèse, du sélénium ou encore du zinc [49].

3.1.1 Vitamines

Le corps humain est incapable de synthétiser les vitamines (à l'exception des vitamines D et K). Ainsi, afin de garantir le bon fonctionnement de l'organisme, elles doivent donc être apportées par l'alimentation. Les vitamines sont impliquées dans de nombreuses voies métaboliques, telles que la construction de l'organisme (croissance, développement du squelette), le fonctionnement et l'entretien de l'organisme (utilisation des macronutriments, la vision, la coagulation du sang, la synthèse d'ADN, le maintien des systèmes musculaire, nerveux et immunitaire). Une alimentation équilibrée et diversifiée permet d'apporter une quantité suffisante en vitamines pour les besoins de l'organisme. Un apport insuffisant entraîne des déficits, ainsi que des carences pouvant entraîner des troubles cliniques ou des pathologies. À l'inverse, un apport trop élevé en vitamines peut avoir des effets délétères, voire toxiques [49].

Il existe treize vitamines différentes, réparties en 2 grandes familles :

- Les vitamines **liposolubles** (vitamines A, D, E et K) : elles sont stockées dans les tissus adipeux et dans le foie. Elles peuvent facilement s'accumuler, ce qui entraîne un risque de toxicité en cas de surdosage.
- Les vitamines **hydrosolubles** (vitamines du groupe B et vitamine C) : elles peuvent être stockées, mais le risque de surdosage n'est pas très élevé du fait de leur élimination via les urines.

Les besoins en chaque vitamine varient en fonction de l'âge, du sexe, de la taille, de l'activité physique et de la présence d'une pathologie.

Parmi les vitamines liposolubles on retrouve les vitamines A, D, E et K [50].

Vitamine A :

Le terme de vitamine A englobe plusieurs molécules : le rétinol et ses métabolites produits par l'organisme (rétinal et acide rétinoïque) qui sont responsables de son activité biologique, ainsi que les caroténoïdes pro vitaminiques (β -carotène et α -carotène). Le rôle biologique attribué à la vitamine A tient principalement à l'effet des acides rétinoïques : régulation de l'expression du génome, fonctionnement du système immunitaire, différenciation des épithéliums muqueux (constituant de l'épithélium rétinien permettant une vision crépusculaire). Un déficit en vitamine A peut entraîner principalement des retards de croissance intra-utérine et post natale, une malformation congénitale, une perte de vision crépusculaire et une sécheresse de la conjonctive oculaire.

- **Sources alimentaires :**

- De rétinol : abats, jaune d'œuf, beurre
- De β -carotène : les légumes (carottes, légumes à feuille vertes, pommes de terre douces) et les fruits (melon, mangue)
- **Apports conseillés :** 750 $\mu\text{g/j}$ chez l'homme adulte et 650 $\mu\text{g/j}$ chez la femme adulte.

Vitamine D :

La vitamine D a pour fonction principale d'augmenter la concentration en calcium et en phosphore nécessaire à notre organisme. En effet, le maintien d'un taux de calcium et de phosphore suffisant permet une minéralisation des tissus (principalement des os, du cartilage et des dents), une

contraction musculaire efficace, une bonne transmission nerveuse, une coagulation adéquate, mais également une différenciation de certaines cellules cutanées. Chez l'humain, la vitamine D est synthétisée de façon endogène par des cellules de l'épiderme, à partir de cholestérol, sous l'action de rayon ultraviolet (UV-B). La synthèse de vitamine D aura donc une grande variabilité interindividuelle en fonction de facteurs tels que le lieu de vie, la saison, l'âge ou encore les vêtements portés. Une carence en vitamine D se manifeste par un rachitisme (chez les enfants) et une ostéomalacie (chez les adultes), par une diminution de la densité minérale osseuse, en particulier chez le sujet âgé et chez la femme ménopausée.

- **Sources alimentaires** : poissons gras (sardines, saumon, maquereau), jaune d'œuf, chocolat noir, beurre et margarine, produits laitiers enrichis en vitamine D
- **Apports conseillés** : 15 µg/j chez les adultes

Vitamine E :

Le terme de vitamine E englobe huit molécules différentes : quatre tocophérols (alpha, bêta, delta, gamma) et quatre tocotriénols (alpha, bêta, delta et gamma). La forme biologiquement la plus active est l'alpha-tocophérol, tandis que la forme la plus abondante dans l'organisme est le gamma-tocophérol. Sa principale fonction au sein de l'organisme est une activité antioxydante au sein des membranes cellulaires, grâce à sa liposolubilité. En effet, la vitamine E permet le maintien de l'intégrité des acides gras poly-insaturés qui composent les membranes cellulaires, ce qui protège la structure et les fonctions biologiques des cellules. Parmi les antioxydants, on retrouve la vitamine E ainsi que la vitamine C ; cependant aucun bénéfice n'a été démontré chez les sportifs entraînés de consommer ces deux vitamines. Un déficit en vitamine E entraîne des symptômes neurologiques, tels que l'ataxie.

- **Sources alimentaires** : huiles végétales (de tournesol, de pépin de raisin, d'arachide)
- **Apports conseillés** : 10 mg/j chez l'homme et 9 mg/j chez la femme

Vitamine K :

La vitamine K regroupe : la vitamine K1 (phylloquinone, phytoménadione et phytonadione) qui joue un rôle majeur dans la coagulation sanguine, la vitamine K2 (ménaquinone) qui joue un rôle dans le métabolisme osseux et la vitamine K3 (ménadione synthétique). La vitamine K est synthétisée de

manière endogène par la flore intestinale : les cas de carence alimentaire en vitamine K sont donc très rares mais ils peuvent entraîner une hémorragie ainsi que des anomalies de croissance osseuse.

- **Sources alimentaires en vitamine K1** : légumes à feuille vertes (chou frisé, épinards, salade, brocolis, haricots verts, épinards, asperge)
- **Apports conseillés en vitamine K1** : 79 µg/j chez l'homme et la femme

Parmi les vitamines hydrosolubles, on retrouve la vitamine C ainsi que les vitamines du groupe B (B1, B2, B3, B5, B6, B8, B9 et B12) [50]. Les vitamines du groupe B participent à la transformation des glucides, des lipides et des protéines en énergie : elles sont donc très importantes pour le sportif d'endurance.

Vitamine C :

La vitamine C, aussi appelée acide ascorbique, est constitutive du tissu conjonctif qui structure les différents tissus de l'organisme. Elle est impliquée dans la synthèse de molécule intervenant dans la transmission nerveuse (par exemple la noradrénaline). Cette vitamine est également un agent réducteur ; elle a des propriétés antioxydantes, en piégeant les espèces réactives de l'oxygène et de l'azote. La vitamine C permet également une meilleure absorption du fer. Une carence en vitamine C se manifeste par la pathologie du scorbut dont les symptômes sont un saignement des gencives, un déchaussement des dents ou des douleurs au niveau des articulations.

- **Sources alimentaires** : les fruits (cassis, agrumes, fraise, kiwi) et les légumes (poivron rouge, persil, chou)
- **Apports conseillés** : 110 mg/jour chez les adultes

Vitamine B1 ou thiamine :

La vitamine B1, aussi appelée thiamine, est principalement impliquée dans le métabolisme des glucides : elle permet de produire de l'énergie à partir des glucides. C'est pourquoi les références nutritionnelles sont indiquées en mg/Mégajoule d'énergie consommée (et non en mg/jour). Elle intervient également dans le bon fonctionnement de la muqueuse intestinale et du système nerveux. La vitamine B1 est mieux absorbée lorsqu'elle est administrée avec du magnésium et d'autres vitamines du

groupe B. La carence en vitamine B1, peut être due à une malabsorption ou à un alcoolisme. Cette carence peut conduire à l'apparition de la pathologie du béribéri, qui se traduit par les symptômes suivants : douleurs des pieds, insuffisance cardiaque, diminution des capacités intellectuelles.

- **Sources alimentaires** : céréales complètes, poisson, œufs, porc, pommes de terre, légumineuses, levure de bière.
- **Apports conseillés** : 0,1mg/MJ, soit environ 1,2 mg/jour

Vitamine B2 ou riboflavine :

La vitamine B2, aussi appelée riboflavine, intervient dans le métabolisme énergétique, c'est-à-dire dans le métabolisme des glucides, des lipides et des protéines. Elle joue également un rôle dans le bon fonctionnement des muqueuses et des cellules. Les cas de carence en vitamine B2 sont rares et asymptomatiques.

- **Sources alimentaires** : levure de bière, volaille, fruits de mer, produits laitiers, œufs, abats, céréales complètes
- **Apports conseillés** : 1,6 mg/jour chez les adultes

Vitamine B3 ou niacine :

La vitamine B3, aussi appelée niacine, intervient dans le métabolisme énergétique, c'est-à-dire dans le métabolisme des glucides, des lipides et des protéines. La vitamine B3 intervient également dans la synthèse des hormones sexuelles et dans la production des globules rouges. Une carence en vitamine B3 peut entraîner un trouble nutritionnel nommé pellagre, qui entraîne une dermatite photosensible, des vomissements, des épisodes de diarrhée et une dépression.

- **Sources alimentaires** : levure de bière, viande, céréales complètes, poisson et légumineuses
- **Apports conseillés** : 1,6 mg/MJ pour les adultes

Vitamine B5 ou acide pantothénique :

La vitamine B5, aussi appelée acide pantothénique, est un constituant de la coenzyme A ; elle permet donc le métabolisme des lipides ainsi que de certaines hormones. La vitamine B5 permet

également la production de globules rouges, ainsi qu'une transmission de l'influx nerveux. Cette vitamine B5 se trouve de façon ubiquitaire dans l'alimentation, les cas reportés de carence sont donc très rares.

- **Sources alimentaires :** ubiquitaire, principalement dans la levure de bière, œufs, abats, légumineuses, champignons, poisson, viande
- **Apports conseillés :** 6mg/jour chez l'homme adulte et 5 mg/jour chez la femme adulte

Vitamine B6 :

La vitamine B6 désigne une famille de six substances dont la plus connue est la pyridoxine. Cette vitamine a pour fonction le métabolisme des acides aminés et du glycogène, la synthèse d'ADN et d'hémoglobine ainsi que l'absorption de magnésium. Une carence en vitamine B6 peut entraîner l'apparition d'une anémie ainsi que des symptômes cutanés.

- **Sources alimentaires :** levure de bière, produits dérivés du soja, graines et fruits protéo-oléagineux, bananes, avocat
- **Apports conseillés :** 1,6 mg/jour chez la femme et 1,7 mg/jour chez l'homme

Vitamine B8 ou biotine :

La vitamine B8, aussi appelée biotine, est impliquée dans le métabolisme des glucides, des lipides et des protéines. La vitamine B8 est apportée par l'alimentation, mais aussi synthétisée par la flore intestinale. La carence en vitamine B8 se caractérise par une dermatite, une perte de cheveux, une ataxie et un retard de développement chez l'enfant.

- **Sources alimentaires :** levure de bière, œufs cuits, légumineuses, poisson, abats, céréales complètes, champignons
- **Apports conseillés :** 40 µg/jour pour les adultes

Vitamine B9 :

La vitamine B9 représente une famille de molécules, appelée les folates, naturellement présents dans l'alimentation. Cette vitamine se trouve dans l'alimentation et les compléments alimentaires sous sa

forme synthétique : l'acide folique. Elle est plus stable que les folates et a également une meilleure biodisponibilité. L'acide folique intervient dans le métabolisme des acides aminés et la division cellulaire, notamment les cellules sanguines et les cellules du système nerveux. La vitamine B9 participe également au fonctionnement du système immunitaire et au maintien de la muqueuse intestinale. Ainsi une déficience en vitamine B9 peut entraîner une anémie mégaloblastique, ainsi qu'un ensemble de malformation congénitale, telle que la fermeture du tube neural lors des premières étapes de l'embryogénèse. La synthèse de la vitamine B9 nécessite la présence de vitamine B12.

- **Sources alimentaires** : légumes verts (épinards, blettes, oseille, laitue), asperges, betterave, légumineuses
- **Apports conseillés** : 330 µg/jour pour les adultes

Vitamine B12 ou cobalamine :

La vitamine B12, aussi appelée cobalamine, est une molécule à base de cobalt, impliquée dans le métabolisme de la vitamine B9 ; en effet la vitamine B12 permet de synthétiser la vitamine B9. La vitamine B12 joue également un rôle dans la synthèse d'ADN, l'hématopoïèse et le développement des cellules du système nerveux. Une carence en cobalamine peut provoquer (particulièrement dans le cas de régime végétalien), une anémie mégaloblastique, ainsi que des troubles nerveux causés par une démyélinisation au niveau du cerveau et de la moelle épinière, pouvant entraîner une irritabilité, des troubles de la mémoire et de l'humeur.

- **Sources alimentaires** : viande, poisson, œufs, poisson, fruits de mer
- **Apports conseillés** : 4 µg/jour chez l'adulte

3.1.2 Minéraux

Les composés minéraux (sels minéraux et oligoéléments) représentent entre 4 % et 5 % du poids de notre corps. Les besoins de chaque individu varient en fonction de l'âge, du sexe et des habitudes de vie (sport, tabagisme, régime végétarien ou végétalien). Une alimentation variée et équilibrée permet de couvrir les besoins en sels minéraux et en oligoéléments quotidiens ; cependant lors de situation pathologique (vomissements répétés, diarrhées importantes) une perte en minéraux, principalement en sodium et en potassium peut créer un déséquilibre impactant la santé de l'individu. Les principaux

minéraux sont le sodium, le potassium, le magnésium, le calcium, le chlore, le phosphore ainsi que le soufre.

Sodium :

Le sodium est le principal minéral perdu par la sueur : il est présent dans l'organisme sous forme de chlorure de sodium (NaCl). L'un des rôles principaux du sodium est de réguler la pression osmotique et donc le volume du liquide extracellulaire, ce qui permet les transmissions nerveuses ainsi que les contractions musculaires. Le sodium a également pour effet d'améliorer l'absorption intestinale des acides aminés, du glucose et de l'eau et de permettre leur réabsorption au niveau rénal. Il est conseillé d'avoir une concentration de 500 à 700 mg/L de sodium dans les boissons d'effort, durant un marathon.

- **Sources alimentaires** : sel de table, charcuterie, fromage
- **Apports conseillés** : 1,5 g/jour chez les adultes, 200 à 300 mg/heure d'effort à adapter en fonction de chaque coureur

Potassium :

Le potassium joue un rôle fondamental dans la transmission nerveuse, la contraction musculaire et la fonction cardiaque. En effet, une hypokaliémie (par exemple lors d'un régime hypocalorique ou une malnutrition) se traduit principalement par des troubles du rythme cardiaque, des crampes et de la fatigue.

- **Sources alimentaires** : bananes, légumineuses, pommes de terre, poisson
- **Apports conseillés** : 3,5 g/jour, 300mg/heure d'effort à adapter en fonction de chaque coureur

Magnésium :

Le magnésium est impliqué dans plus de 300 réactions enzymatiques et donc dans de nombreuses voies métaboliques, telles que : le métabolisme du calcium, le transport ionique du potassium, ainsi que la production d'énergie et les réactions impliquant de l'ATP (notamment des réactions enzymatiques de la glycolyse et du cycle de Krebs).

- **Sources alimentaires** : légumineuses, chocolat noir, cacao en poudre, fruits séchés, fruits de mer, graines et protéo-oléagineux
- **Apports conseillés** : 420 mg/jour chez l'homme et 360 mg/jour chez la femme, 50mg/heure d'effort

Calcium :

Le calcium est le minéral le plus abondant du corps humain ; il constitue 1 % à 2 % du poids corporel et se trouve principalement dans le squelette. Le rôle principal du calcium est la minéralisation et la structure du squelette. En effet, une carence en calcium entraîne des dysfonctionnements, tels que l'ostéoporose, l'ostéomalacie et augmente le risque de fracture osseuse. Le calcium intervient également dans de nombreuses fonctions biologiques telles que la libération d'hormones, la coagulation sanguine, l'excitabilité neuromusculaire et l'activation d'enzymes. L'absorption du calcium, ainsi que sa réabsorption au niveau rénal sont favorisées par la vitamine D, qui exerce une régulation fine du calcium au niveau de la matrice osseuse.

- **Sources alimentaires :** les produits laitiers, les légumineuses, les produits céréaliers, les fruits de mer, les amandes, les sardines
- **Apports conseillés :** 900 mg/jour

Chlore :

Dans l'organisme, le chlore est présent à l'état ionique (Cl^-). Il permet notamment de maintenir un équilibre acido-basique, ainsi qu'un équilibre osmotique et permet une activité nerveuse et musculaire correcte. Les cas de déficience en chlore sont très peu documentés et rare, notamment dû au fait que les ions chlorures sont présents dans l'alimentation grâce aux procédés de transformation (par exemple pour la conservation).

- **Sources alimentaires :** charcuterie, fromage, poissons fumés salés
- **Apports conseillés :** 2,3 g/jour

Phosphore :

Le phosphore est présent dans l'organisme sous forme de phosphates, principalement de calcium et de potassium. On considère qu'il est présent à hauteur de 85 % dans les os et les dents. Il intervient dans de nombreuses fonctions biologiques, telles que la mise en réserve et le transport de l'énergie, la régulation de l'équilibre acido-basique, la minéralisation osseuse et dentaire. Le taux de phosphore dans l'organisme est finement régulé par la vitamine D. Ainsi, la carence en phosphore est rarement liée à un déficit en apport alimentaire : elle est liée à un trouble métabolique, un alcoolisme chronique ou encore

à une septicémie. Les symptômes de cette carence vont être principalement une anorexie, une anémie, une faiblesse musculaire, des douleurs osseuses, ainsi qu'un rachitisme et une ostéomalacie.

- **Sources alimentaires** : lait de vache, produits laitiers, les œufs, le poisson, les abats, la viande
- **Apports conseillés** : 550 mg/jour

3.1.3 Oligoéléments

Fer :

Le fer est nécessaire au transport de l'oxygène dans le sang : c'est donc un oligo-élément jouant un rôle indispensable dans la respiration et nécessaire chez le sportif d'endurance. Le fer est présent dans les aliments sous deux formes, le fer héminique et le fer non héminique :

- Le fer héminique (Fe^{2+}) : il est associé à l'hémoglobine et est donc présent dans les aliments d'origine animale.
- Le fer non héminique (Fe^{3+}) : on le retrouve dans la plupart des aliments, qu'ils soient d'origine animale ou végétale.

Le fer héminique est mieux absorbé que le fer non héminique : son absorption dépendra de nombreux facteurs tels que la réserve en fer, la présence de composés augmentant son absorption (la vitamine C, le cuivre) ou au contraire la présence de composés diminuant son absorption (tels que les tannins contenus dans le thé ou le café).

Il existe un équilibre entre les apports et les pertes dans l'organisme : en effet les pertes de fer (principalement liées aux menstruations) sont compensées par un recyclage du fer présent dans les globules rouges ainsi que par les réserves au niveau du foie, de la rate et de la moelle osseuse. La conséquence d'une carence en fer est l'anémie dite « ferriprive » qui entraîne une diminution des globules rouges sanguins et donc une difficulté à transporter l'oxygène jusqu'aux cellules. Les symptômes de l'anémie ferriprive sont une fatigue, des maux de tête, des vertiges et un essoufflement. Les personnes sensibles à cette déficience en fer sont les personnes en pleine croissance (tels que les nourrissons, les enfants, les femmes enceintes) ou encore les femmes souffrant de saignements menstruels abondants.

- **Sources alimentaires** : foie, viandes, légumineuses, les noix, les céréales
- **Apports conseillés** : 11 mg/jour chez l'homme, 16 mg/jour chez la femme non ménopausée et 11 mg/jour chez la femme ménopausée.

Chrome :

Le chrome est un oligoélément initialement décrit comme indispensable dans le métabolisme énergétique des glucides ainsi que dans l'activité de l'insuline. Cependant, son activité est aujourd'hui controversée et l'essentialité des apports en chrome est remise en question. C'est pourquoi l'ANSES, en l'absence de données supplémentaires, n'a pas établi de référence nutritionnelle pour le chrome. De plus, on retrouve le chrome de façon ubiquitaire dans l'alimentation.

Iode :

L'iode est principalement utilisé dans la synthèse des hormones thyroïdiennes. Ces dernières jouent un rôle dans de nombreuses fonctions biologiques, telles que la croissance cellulaire, la thermogénèse, l'équilibre glucidique et lipidique ainsi que la synthèse protéique. L'apport d'iode est nécessaire notamment lors du développement cérébral du fœtus au cours des premiers mois de grossesse, ainsi que lors de la croissance de l'enfant. Lors d'une carence en iode, on observe un goitre au niveau de la thyroïde, qui peut aller jusqu'à une hypothyroïdie, dont les symptômes sont une fatigue, une prise de poids, de l'anxiété ou encore une frilosité.

- **Sources alimentaires :** algues, sel iodé, poissons, jaune d'œuf, lait
- **Apports conseillés :** 150 µg/jour chez les adultes

Zinc :

Le zinc est un oligoélément nécessaire à la production d'énergie et ayant un pouvoir antioxydant. Cependant l'assimilation de zinc au niveau de l'intestin peut être diminuée par certains aliments contenant notamment des phytates, présents dans les céréales et les légumineuses. Une carence en zinc entraîne un ralentissement de la croissance, ainsi qu'une diminution des fonctions immunitaires.

- **Sources alimentaires :** la viande, les abats, le fromage, les légumineuses, les poissons et les fruits de mer
- **Apports conseillés :** 12 mg/jour chez l'homme et 10 mg/jour chez la femme

Cuivre :

Le cuivre est un oligoélément intervenant dans la composition de nombreuses enzymes engagées dans de nombreuses réactions biochimiques. Le cuivre joue notamment un rôle dans la composition du cartilage, l'intégrité du tissu conjonctif, la minéralisation osseuse, les fonctions immunitaires ainsi que le métabolisme du fer (le cuivre étant un constituant de l'hémoglobine, il permet une meilleure assimilation du fer). La carence en cuivre se manifeste par différentes pathologies, telles que l'anémie hypochrome, une hypocholestérolémie, une neutropénie ou encore une leucopénie.

- **Sources alimentaires :** les abats, les crustacées, les mollusques
- **Apports conseillés :** 1,5 mg/jour chez la femme et 1,9 mg/jour chez l'homme

Fluor :

Le fluor ne joue pas un rôle essentiel dans la croissance et le développement de l'organisme. En effet, aucun signe de déficience en fluor a été identifié, le fluor ayant un taux d'absorption très élevé (80-90%). Chez l'adulte, environ 40% du fluor se fixe sur les tissus calcifiés (os, dents) tandis que seulement 1% est capté par les tissus mous. Pour autant, aucune preuve n'a montré de lien entre l'apport en fluor et la solidité osseuse. Le fluor est principalement impliqué dans la prévention des caries. Les aliments riches en fluor ne sont pour l'instant pas recensés : afin d'avoir un apport en fluor il est recommandé d'utiliser des eaux ou des aliments reconstitués à partir d'eaux fluorées.

- **Apports conseillés :** 3,4 mg/jour chez l'homme et 2,9 mg/jour chez la femme

3.2 Sportif : supplémentation nécessaire ?

3.2.1 Les compléments alimentaires : une obligation ?

Au vu des nombreuses heures d'entraînement lors de la préparation à un marathon, on peut se demander si un sportif développe des carences particulières durant la phase d'entraînement. Il faut tout d'abord savoir que certains minéraux et vitamines jouent un rôle plus important que d'autres dans les performances sportives ; il s'agit du fer, du calcium, du cuivre, du zinc, du magnésium, des vitamines, ainsi que d'autres substances que nous allons détailler dans la partie 3.2.2. Plusieurs études scientifiques ont montré qu'une alimentation équilibrée et variée permettent à la majorité des athlètes (environ 70%) de couvrir les besoins en minéraux et en vitamines. Plusieurs situations peuvent être mises en cause, pour les sportifs ayant des déficits particuliers [45] :

- Une restriction des apports alimentaires, afin de satisfaire un objectif de perte de poids. Ce phénomène est également appelé l'orthorexie ; il est plus souvent remarqué chez la femme que chez l'homme.
- Une alimentation stéréotypée et non variée, avec une consommation d'aliments à faible densité nutritionnelle.

La couverture des besoins en minéraux et en vitamines peut se faire simplement grâce à une alimentation variée et fondée sur des aliments riches en nutriments, tel que les légumes, les fruits, les fèves, les graines, les viandes maigres, les poissons, les produits laitiers et les huiles végétales non saturées.

Afin de fournir des données les plus précises possibles sur les compléments alimentaires, l'Institut Australien du Sport (AIS) a créé le programme de complémentation alimentaire. Ce dernier a été lancé en 2000, à la suite d'une vaste étude sur la complémentation alimentaire des athlètes de l'AIS. Il est depuis considéré comme une référence dans la majorité des pays. En effet :

- Il fournit aux athlètes et aux entraîneurs de l'AIS des données sur les compléments alimentaires, notamment dans les domaines de la recherche, de la formation et de la consommation.
- Ses activités et ses ressources sont publiées sur internet et disponibles pour tous.
- L'institut fait évoluer le programme afin de le faire correspondre au développement de la recherche et de la mise sur le marché de nouveaux produits.
- Il réduit les risques pris par les athlètes en cas de contrôle antidopage.

L'histoire des compléments alimentaires rapporte tout d'abord que les sportifs, qu'ils soient professionnels ou amateurs en sont de grands consommateurs. En effet, ils sont une cible importante de l'industrie commercialisant ces produits, ces derniers étant de plus en plus consommés, grâce notamment à un marketing intensif, des allégations de propriétés miraculeuses et des témoignages d'athlètes reconnus. Malheureusement, la commercialisation de ces produits a lieu à un rythme élevé, ce qui empêche les chercheurs de tous les analyser au fil de leur mise sur le marché. Ces produits sont étudiés et analysés par les scientifiques, afin de vérifier leurs qualités ainsi que le respect de la composition et les règles d'étiquetage. Devant un tel afflux de compléments alimentaires sur le marché, le programme de complémentation alimentaire de l'AIS a déclaré que la prise de complément alimentaire devait avoir lieu après avoir eu l'aval d'un médecin. D'autres organisations tel que le CIO ont également stipulé qu'un régime équilibré était suffisant dans le programme nutritionnel d'un athlète [45].

Cependant, ces positions entraînent plusieurs constatations :

- Certains produits, sûrs et légaux, provenant de circuit de distribution sécurisés, peuvent être bénéfiques pour les performances des sportifs.
- La différence entre les compléments alimentaires et les produits énergétiques s'estompe. Traditionnellement, on considérait les produits énergétiques (barres, gels, purée) comme des sources nutritionnelles classiques. Aujourd'hui, elles contiennent également des minéraux et des vitamines, considérés comme des compléments.

Le programme de complémentation alimentaire de l'AIS a donc publié une pyramide générale directive, qui résume le rôle faible, mais précieux que les compléments alimentaires jouent dans la stratégie nutritionnelle du sportif.

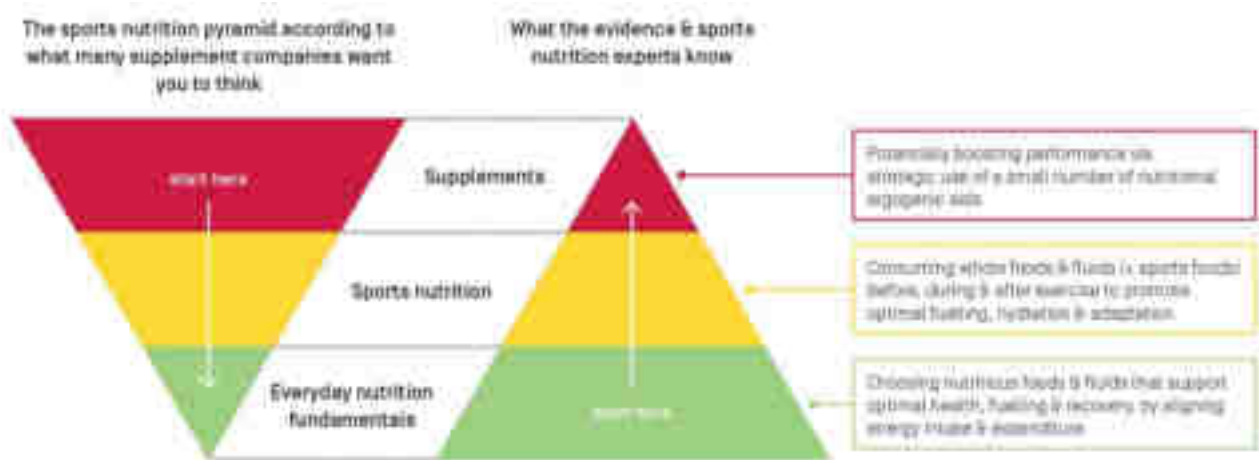


Figure 42 : Rôle des compléments alimentaires dans la stratégie globale de l'athlète [51]

Un comité d'expert en nutrition du sport, appartenant au programme de complémentation alimentaire de l'AIS a établi un classement des substances (minéraux, vitamines, etc), selon leurs effets sur la performance. Ils ont établi un système composé de quatre classes, en fonction du rapport bénéfice-risque des substances et des analyses des produits. Le classement des substances est réévalué chaque année, afin de vérifier que le produit correspond toujours aux règles en vigueur. On retrouve dans l'ordre :

- Le groupe A : il contient les substances recommandées dans certaines situations spécifiques
- Le groupe B : il contient les substances pour lesquelles la recherche doit être poursuivie, pour identifier les situations spécifiques où ils doivent être consommés
- Le groupe C : il contient les substances pour lesquelles aucun avantage n'a été découvert

- **Le groupe D** : il contient les substances interdites ou présentant un risque élevé de contenir des ingrédients interdits (modulateurs métaboliques, stéroïdes anabolisants, autres agents anabolisants, stimulants, $\beta 2$ agonistes)

<p>Groupe A</p> <p>Fournis aux athlètes de l'AIS pour leur efficacité prouvée.</p>	<p>Recommandés dans certaines situations.</p>	
	<p>Exemples</p> <ul style="list-style-type: none"> • Biscuits énergétiques • Gel énergétique • Cordons énergétiques • Biscuits liquides • Protéines de petit-lait • Barre énergétique • Complément de calcium • Complément de fer 	<ul style="list-style-type: none"> • Probiotiques pour protéger la flore intestinale • Multivitaminés/minéraux • Vitamine D • Remplacement des électrolytes • Caféine • Créatine • Bicarbonate
<p>Groupe B</p> <p>Fournis aux athlètes de l'AIS avec un protocole de recherche.</p>	<p>Doivent faire l'objet de recherches supplémentaires pour identifier les situations spécifiques et les protocoles d'utilisation.</p>	
	<p>Exemples</p> <ul style="list-style-type: none"> • β-alanine • Jus de betterave • Antioxydants C et E • Carnitine 	<ul style="list-style-type: none"> • HMB • Huiles de poisson • Quercétine
<p>Groupe C</p> <p>Nut fournis aux athlètes de l'AIS dans le cadre de programmes AIS.</p>	<p>N'ont démontré aucun effet bénéfique.</p> <p>Les athlètes qui souhaitent utiliser ces produits le font après en avoir eux-mêmes apprécié les risques, y compris celui de la contamination. Ils doivent en informer un des médecins du sport de l'AIS.</p>	
	<p>Exemples</p> <ul style="list-style-type: none"> • Biotine • Lact-Away • Coenzymes Q10 • Compléments vitaminés en dehors des protocoles du groupe A • Eau oxygénée • Glucosamine <p>Le reste : si vous ne l'avez pas trouvé ailleurs, il doit probablement figurer dans cette liste.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Protéinate de chrome • Ginseng • Autres herbes (particeps, Rhodiola Rosea) • ZMA • Inosine • Pyruvate
<p>Groupe D</p> <p>Ne devraient pas être utilisés par des athlètes de l'AIS.</p>	<p>Interdits ou présentant un risque élevé de contamination.</p>	
	<p>Exemples</p> <p>Stimulants :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ephédrine • Strychnine • Sibutramine • Méthylhexanamine <p>Glycérol : les protocoles d'hyperhydratation incluent le glycérol sont considérés comme des succédanés de plasma et ont été ajoutés à la liste des produits interdits par l'AMA.</p>	<p>Prohormones ou stimulateurs hormonal :</p> <ul style="list-style-type: none"> • DHEA • Androsténone • 1β-nandrosténone/dihydroépi • Tribulus terrestris et autres stimulateurs de la testostérone

Figure 43 : Système de classification des compléments alimentaires de l'AIS [51]

Cette classification par groupe, basée sur des évaluations scientifiques permet de garder un raisonnement pragmatique et d'éviter les visions binaires entre les catégories.

3.2.2 Correction des déficits

Chez le sportif d'endurance, la perte sudorale liée à l'activité physique entraîne des besoins majorés en vitamines et en minéraux spécifiques, par rapport à un individu sédentaire. De ce fait, le coureur a des besoins accrus en vitamines à rôle énergétique (B1, B2, B3, B6) et en minéraux antioxydants (zinc, cuivre). Les compléments alimentaires ont pour objectif de corriger les carences en vitamines ou en

minéraux ; cependant il est nettement plus avantageux pour un sportif de modifier ses habitudes alimentaires, que de les corriger au long terme avec des compléments alimentaires. De plus avant toute supplémentation énergétique, il est nécessaire de réaliser un bilan nutritionnel et biologique pour évaluer les carences éventuelles et envisager la prise de compléments alimentaires, avec l'accord du corps médical. Dans le cas de prise de complément alimentaire sans suivi médical, il peut être tentant d'augmenter les posologies, cependant cela n'améliore pas la performance. Pire encore, l'apport massif d'un micronutriment peut entraîner un déficit en un autre micronutriment, certains utilisant la même voie d'absorption (vitamines B1 et B2). Il est également essentiel de respecter les Apports Nutritionnels Recommandés (ANC), car un apport trop important en certaines vitamines peut causer un surdosage.

Parmi les compléments alimentaires bénéfiques à un athlète sur sa performance ou permettant de corriger une carence prouvée, on retrouve les compléments du groupe A de la classification de l'AIS :

- **Calcium**

Il existe un lien direct entre l'apport calcique alimentaire et la minéralisation osseuse. Chez les sportifs d'endurance, il a été observé une consommation insuffisante de calcium, notamment chez les femmes, pouvant conduire à un risque accru de blessure.

Situations sportives dans lesquelles elles sont majoritairement utilisées :

- Athlètes ayant un comportement alimentaire désordonné

Principales sources alimentaires :

- Lait (1 bol de 250 ml) : 32% des ANC
- Yaourt (1 pot de 125g) : 20% des ANC
- Fromage blanc (1 pot de 180g) : 14% des ANC

- **Fer**

Le fer est présent à 80% sous forme active, associé à l'hémoglobine dans les globules rouges. Il a donc un rôle important à jouer dans l'activité physique. La carence en fer se manifeste par une fatigue accrue et une diminution de la capacité à effectuer un exercice. Cette carence est principalement observée chez les femmes, en raison des pertes de sang des menstruations, ainsi que des apports alimentaires restreints.

Situations sportives dans lesquelles elles sont majoritairement utilisées :

- Sportives en période de menstruation
- Sportifs éprouvant une fatigue générale avérée (ferritine basse, hémoglobine basse)

Principales sources alimentaires :

- Boudin : 140 % des ANC
- Foie : 45% des ANC
- Moule (1 assiette) : 50% des ANC
- Bœuf (1 steak) : 25% des ANC

• **Magnésium**

Le magnésium joue un rôle essentiel dans de nombreuses réactions enzymatiques. Une étude scientifique a démontré que près d'un quart des marathoniens de haut niveau ont des apports en magnésium insuffisants. Les recommandations actuelles sont de consommer 6mg/kg/jour.

Principales sources alimentaires :

- Pain aux céréales (120g) : 100 mg
- Légumes et fruits : épinards, bananes, haricots
- Chocolat noir

• **Multivitamines et minéraux**

Les vitamines et les minéraux sont des composés biologiques, pour la plupart non synthétisables par l'organisme, impliqués dans de nombreuses fonctions biologiques essentielles.

Situations sportives dans lesquelles elles sont majoritairement utilisées :

- Athlètes réduisant les apports caloriques
- Athlètes soumis à des longues période de déplacement, pendant lesquelles l'alimentation est perturbée
- Athlètes enchaînant des compétitions importantes ou des entraînements intenses

- **Bicarbonate**

Lors d'un effort intense et de courte durée, le muscle produit de l'acide, sous forme de protons (H^+). Comme vu dans la deuxième partie, cette acidification du milieu intramusculaire génère une fatigue musculaire importante. Afin de neutraliser cette acidité, les suppléments en bicarbonates sont largement utilisés par les athlètes. La supplémentation doit se faire de manière ponctuelle en fonction de la masse corporelle (à une dose de 300mg/kg), en raison des troubles gastro-intestinaux.

Situations sportives dans lesquelles elles sont majoritairement utilisées :

- Activités intenses, ayant une durée comprise entre 1 et 7 minutes
- Exercices intermittents intenses

Principales sources alimentaires :

- Fruits et légumes (aliments alcalins)
- Yaourts et laitages (aliments neutres)
- Boissons gazeuses

- **Caféine**

Depuis le mois de janvier 2004, la caféine ne fait plus partie des substances considérées comme dopantes. Ses effets sur l'organisme humain sont complexes et variés : elle permet d'augmenter la concentration d'acides gras et de glycérol circulant, ainsi les graisses sont plus utilisées à l'effort. La caféine provoque également une augmentation de la contractilité des cellules musculaires à l'effort, ainsi qu'une stimulation des hormones de stress. La présence de caféine dans les boissons de l'effort, augmente la dose totale de caféine ingérée par le sportif : il faut donc être vigilant à un éventuel état de déshydratation. La dose maximale de caféine, à laquelle des effets bénéfiques sont constatés est de 6 mg/kg/jour (par exemple pour un adulte de 70 kg, 420 mg de caféine par jour, soit 3 tasses par jour) : au-delà de cette dose, aucun effet positif supplémentaire n'est ressenti et la caféine produit des effets secondaires néfastes pour la santé (insomnie, tachycardie).

Situations sportives dans lesquelles elles sont majoritairement utilisées :

- Exercices très intenses et de courte durée
- Avant ou pendant un effort d'endurance d'une durée supérieure à 1 heure.

Principales sources alimentaires :

- Café (120 ml) : 120 mg
- Thé (1 tasse) : 50 mg
- Boisson énergisante (1 canette) : 80 mg
- Soda (1 canette) : 32 mg

- **Protéines de lait**

Les protéines de lait sont composées de :

- Lactosérum : que l'on appelle également la protéine de petit-lait. Il constitue la phase aqueuse du lait après l'avoir caillé.
- La caséine : il s'agit de la phase solide du lait après l'avoir caillé.

Ces deux protéines sont une importante source de composés azotés, notamment d'acide aminés branchés, ont une faible teneur en lipides et sont pauvre en calories. Le lactosérum majore et prolonge l'hypertrophie musculaire en période de récupération, car il est beaucoup mieux absorbé au niveau intestinal que la caséine. Il est préférentiellement utilisé dans la phase précoce de récupération et de reconstruction musculaire. Chaque litre de lait de vache contient des lipides, des vitamines, des minéraux, ainsi qu'environ 30 g de protéines, soit près de 80% de caséine et 20% de lactosérum. C'est pourquoi le lait est très souvent consommé en période de récupération.

Situations sportives dans lesquelles elles sont majoritairement utilisées :

- Athlète en période de musculation à charge importante
- Athlète d'endurance ayant effectué des exercices prolongés

Principales sources alimentaires :

- Lait de vache demi écrémé ou écrémé (1 bol de 250 ml) : 2 g de lactosérum

- **Créatine**

La créatine est un dérivé d'acide aminé naturel ; il est synthétisé par l'organisme et apporté également par l'alimentation (viandes, poissons). La créatine a pour rôle d'apporter de l'énergie aux cellules musculaires, en créant notamment de l'ATP, à partir de phosphate et d'ADP. Ainsi, un apport en créatine

permet de fournir un effort de haute intensité de manière brève : cependant elle ne permet pas d'augmenter le volume musculaire, ni d'améliorer l'activité aérobie.

Situations sportives dans lesquelles elles sont majoritairement utilisées :

- Répétitions d'exercices brefs, intenses avec temps de récupération court

Principales sources alimentaires :

- Hareng : 6,7 g/kg
- Porc : 5,1 g/kg
- Bœuf : 4,4 g/kg
- Saumon : 4,4 g/kg

4 Limites et dérives de la nutrition chez le marathonien

4.1 Impacts de régimes spécifiques chez le sportif

4.1.1 Restriction alimentaire

De nombreux athlètes pratiquant différentes disciplines sportives se soumettent à des restrictions alimentaires diverses et variées pouvant avoir des effets néfastes sur leur santé à long terme. Les objectifs de ces régimes sont une meilleure estime de soi, une recherche du perfectionnisme et un contrôle du poids corporel. Ces cures s'avèrent importantes dans certaines disciplines telles que la gymnastique, la danse ou encore les sports de combat à catégorie de poids. Elles ont pour conséquence le déséquilibre de la balance énergétique ; une dépense énergétique quotidienne élevée (jusqu'à 6 000 kcal) et des apports énergétiques restreints [52].

Une étude a été menée sur une population composée de 127 personnes, afin d'évaluer la prévalence et les motivations des troubles du comportement alimentaire. Cette étude inclut 127 sujets, dont 96 sportifs(-ves) pratiquant un sport individuel ou collectif au niveau national et 31 personnes sédentaires. Les résultats de cette étude ont montré que [52] :

- Les troubles du comportement alimentaire atteignaient plus les sportives.
- 33,1 % des sportives présentaient des troubles du cycle.
- La prévalence des troubles du comportement alimentaire était plus élevée chez les cyclistes (30,7%), les judokates (25%) et les gymnastes (22,3%).

- Les personnes sédentaires féminines ainsi que les hommes (sportifs et sédentaires) ne présentaient pas de trouble du comportement alimentaire.

La prévalence des troubles du comportement alimentaire est donc plus élevée chez les sportives que chez les sportifs.

Les effets physiologiques d'une période de restriction alimentaire sont nombreux. Dans un premier temps, on observe une perte de glycogène hépatique ainsi qu'une perte de 50% de glycogène musculaire. Cette perte s'accompagne d'une perte en eau, environ 3 à 4 grammes d'eau par gramme de glycogène perdu. Dans un second temps, suite à la perte en eau et en glycogène, on observe une perte en graisse et en composés azotés.

Au cours d'une période de 10 jours d'amaigrissement volontaire, on a pu estimer que la perte de poids correspondait à hauteur de 54 % à 58 % à une perte en eau, de 6% à 16% à une perte en composés azotés et de 30% à 35% à une perte en graisse. Plus la durée de restriction d'apport énergétique est longue et plus la part de graisse oxydée sera importante. Pour un sportif chez qui une perte de poids est obligatoire, un suivi adapté au sport et aux caractéristiques de l'athlète est nécessaire. En effet, les variations du poids corporel doivent être progressives, sans restriction énergétique importante et sans comportements à risque, afin de ne pas développer de carence [7]. En moyenne, la perte de poids doit se situer entre 0,5 et 0,9 kg par semaine et ne doit pas dépasser une perte hebdomadaire de plus de 1,5 % du poids corporel [45].

Les périodes de restrictions alimentaires drastiques et incontrôlées peuvent avoir de nombreux effets secondaires [7]. Ainsi le risque majeur d'une stratégie de perte de poids et de masse grasse est la contre-performance : perte de coordination des mouvements, manque de motivation générale, diminution de l'endurance, diminution de la force, perte de masse maigre et un niveau physique général moins bon que d'habitude. L'une des conséquences d'une restriction alimentaire abusive est un déficit d'apport en fer, ce qui peut entraîner l'apparition d'une anémie ferriprive et le développement d'une fatigue chronique. Chez les athlètes féminines soumises à des restrictions, les troubles des règles (aussi appelée oligoménorrhée) sont fréquents. En effet, il existe une relation entre les faibles apports énergétiques et les troubles des règles, même si le régime hypocalorique n'est pas la seule cause des oligoménorrhées. La principale conséquence de cette dernière est une diminution de la densité minérale osseuse, avec un risque accru de fracture de fatigue et à long terme d'ostéoporose. Enfin, de l'avis unanime des sportifs soumis au contrôle strict de leur poids et de leur prise alimentaire, ces derniers développent de l'anxiété, des tensions, une fatigue et un état de stress psychologique importants.

Restrictions alimentaires et hydriques, et conséquences sur la santé (Régime non exhaustif)	
Croissance et maturation	<ul style="list-style-type: none"> • La maturation sexuelle peut être retardée chez la gymnaste (Caine et al. 2001). • La croissance pubertaire est sensible aux facteurs nutritionnels. Des taux d'IGF-1 circulants inférieurs et des concentrations en IGFBPs plus faibles sont alors observés (Smith et al. 1995). • La densité minérale osseuse peut être définitivement altérée chez de jeunes sportifs en restriction énergétique chronique (Deutz et al. 2000).
Fatigue chronique, blessures et système immunitaire diminué	<ul style="list-style-type: none"> • Des épisodes fréquents de fatigue chronique, blessures et fragilités face aux maladies sont notés chez le sportif lors de restrictions énergétiques sévères (Sundgot-Borgen et Garthe 2011 ; Burke et al. 2004 ; Gleeson et al. 2004). • Chez les gymnastes avec retard de ménarche, la diminution des taux d'œstrogènes et la consommation moindre de protéines et de calcium favorisent le risque de fracture de fatigue (Lusli et Bensch 1990 ; Bensen et al. 1990).
Déshydratation	<p>Les états de déshydratation génèrent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • une baisse du volume plasmatique sans augmentation concomitante de la fréquence cardiaque. • une diminution du taux de sudation qui favorise l'hyperthermie. • une moindre activité des fonctions cognitives. • l'apparition de crampes liées aux déficits en micronutriments. • des troubles digestifs. • une élévation de la perception de l'effort. • une anxiété. • une fatigue précoce. • des tensions nerveuses. • de la colère... (Sundgot-Borgen et Garthe 2011).
Efficacité alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> • L'efficacité alimentaire est définie par le rapport entre la variation de poids et les kilocalories ingérées. Il s'agit donc d'un indice indiquant combien de kilocalories un sportif peut manger pour maintenir un poids stable. L'efficacité alimentaire augmente après des régimes « yo-yo » répétés (soit une très forte variation de poids), ce qui explique en partie la difficulté grandissante à conserver sur une période prolongée une faible masse corporelle (Brownell et al. 1987).
Désordres alimentaires	<ul style="list-style-type: none"> • Les sportifs pratiquant des activités nécessitant un gabarit très « sec » (masse grasse très faible) présentent plus de risques de développer des troubles alimentaires (Sundgot-Borgen 1996). Ainsi, 62 % de la population sportive de haut niveau pourrait souffrir de perturbations d'ordre alimentaire (Bonci et al. 2008).

Figure 44 : Conséquences possibles d'un régime hypocalorique [45]

4.1.2 Régime cétogène

Le régime cétogène est un régime alimentaire pauvre en glucides, modéré en protéines et riche en lipides. On parle en anglais de régime « *low carb high fat* ». L'objectif de ce régime est de réduire la consommation de glucides au profit des lipides. Ces derniers vont permettre la production de molécules appelées corps cétoniques, qui sont un carburant supplémentaire pour l'organisme.

En effet lors d'un régime appauvri en glucides ou en période de jeûne, l'organisme puise tout d'abord dans ses réserves : le glycogène est dégradé en glucose. Après l'épuisement de ces réserves, qui survient en une à deux semaines, l'organisme utilise les acides gras issus du tissu adipeux. Comme indiqué dans le paragraphe 2.1.3 sur l'utilisation des acides gras, ces derniers sont dégradés via l'hélice

de Lynen en molécules d'acétyl-coA dans la matrice mitochondriale hépatique. En période de jeûne, les molécules d'acétyl-coA s'accumulent dans la mitochondrie et ne peuvent pas être prises en charge par l'oxaloacétate pour entrer dans le cycle de Krebs et produire de l'énergie. Ainsi dans le foie la molécule d'acétyl-coA est métabolisée par une autre enzyme, afin de produire des corps cétoniques : c'est la cétogénèse. Les corps cétoniques sont au nombre de trois : l'acétoacétate, le 3- β -hydroxybutyrate et l'acétone. Ils sont de petites tailles, facilement transportables dans les tissus extra-hépatiques, où ils sont hydrolysés via la cétolyse et produisent de l'énergie [53].

Le régime céto-gène permet d'activer la production de cétones, dès lors que les réserves glycogéniques sont épuisées.

Le principe du régime céto-gène est de ne consommer que 20 à 50 grammes de glucides par jour et de cibler un apport lipidique important, correspondant à 70 % à 90 % de la ration calorique totale. Il convient [54] :

- D'éliminer les glucides de l'alimentation quotidienne : certains fruits (bananes, mangues, pomme, poires, raisins), les légumineuses, les féculents, les céréales, les sucreries, le pain, les biscuits ...
- De privilégier les protéines et les lipides sous forme : de certains fruits (mûre, groseille, framboise, fraise, cassis, myrtille, rhubarbe, citron), de certains légumes (concombre, chou, mâche, fenouil, épinards, courgette, navet, artichaut, aubergine, brocoli), d'oléagineux (noix, amandes, noisettes, graines de sésame, etc), de produits laitiers (yaourts, crème fraîche, lait entier), de viandes, de charcuteries, de poissons et d'œufs, de matière grasse (huile de coco, de colza, d'olive, de noix, beurre, saindoux, graisse de canard)

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi
Déjeuner	Salade d'avocat à l'huile de noix Rôti de veau Purée de chou-fleur Morbier	Concombre à la crème Papillote de poisson au paprika Mousse de céleri Petits suisse nature avec des pistaches	Salade de fêta Rôti de dinde aux herbes Carottes sautées Œufs au lait et amandes concassées	Poireaux vinaigrette Escalope de poulet à la tomate et au basilic Poêlée méridionale Salade verte à l'huile de colza Comté	Assiette garnie de crudités à la fêta Grillade de pêcheur aux agrumes Purée de céleri Camembert	Salade composée au thon et aux olives Poulet rôti aux herbes Chou brocoli
Dîner	Soupe de courge Poulet rôti au thym Poêlée de légumes Coupe de fromage blanc de brebis et amandes effilées	Potage de légumes Lapin braisé au romarin Haricots beurre à l'échalote Salade verte à l'huile de colza	Soupe à la citrouille Tartare de thon à l'olive Salade verte à l'huile de colza Yaourt nature de brebis et éclats de noisette	Consommé brunoise Œufs à la coque et fondue d'endives Salade verte à l'huile de colza Petits suisse et purée d'amande	Bouillon de bœuf Paupiette de volaille à la graine de moutarde Gratin de légumes Salade verte à l'huile de colza Fromage blanc	Velouté de carottes au gingembre Assiette de crustacés et de coquillages Salade verte à l'huile de colza Yaourt nature à la graine de pavot

Exemple d'une semaine de menus cétogènes

Les effets bénéfiques du régime cétogène seraient [53] :

- Une perte de poids rapide,
- Une absence de pic de glycémie ou d'hypoglycémie,
- Une diminution de la sensation de faim,
- Une meilleure tolérance digestive,
- Une utilisation préférentielle des lipides,
- Une action anti-inflammatoire grâce au 3- β -hydroxybutyrate
- Un traitement chez les enfants atteints d'épilepsie, sur qui les traitements conventionnels n'auraient pas fonctionné

Cependant face à une augmentation du nombre de partisans du régime cétogène, il est nécessaire de rappeler que le recul sur ses effets sont très peu connus et étudiés. Ce régime ne doit se faire que sous contrôle d'un médecin. Il est néanmoins déjà apparu que ce régime peut entraîner [55] :

- Une carence en vitamines, minéraux et en fibres
- Des dysménorrhées (douleurs menstruelles)
- Des troubles digestifs (constipations, nausées)
- Maux de tête
- Risque accru de calculs rénaux
- Un effet rebond à l'arrêt du régime cétogène avec une prise poids compensatoire rapide
- Une diminution de la densité osseuse, pouvant conduire à un ralentissement de la croissance chez l'enfant, une augmentation de l'ostéoporose et un risque accru de fatigue.
- Une action pro-inflammatoire, contrairement à l'allégation anti-inflammatoire du régime cétogène. L'Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale (INSERM) a publié en 2019 une étude démontrant que le 3- β -hydroxybutyrate, favorise l'inflammation au sein de l'organisme.
- Une absence de bénéfice chez les patients épileptiques. En effet suite aux allégations de régime miracle pour les patients atteints d'épilepsie, une analyse croisée des essais cliniques a été publiée en 2020 par le réseau Cochrane. Il est démontré qu'il n'existe aucun effet bénéfique du régime cétogène sur les patients atteints d'épilepsie. Bien au contraire de nombreux effets indésirables ont été prouvés, notamment digestifs, ainsi qu'une difficulté à mettre en œuvre quotidiennement ce régime.

4.1.3 Régime dissocié scandinave

Le Régime Dissocié Scandinave (RDS) est un régime connu des sportifs d'endurance. Ce régime a été créé dans les années 1970 par des chercheurs scandinaves lors de leurs recherches sur l'alimentation du skieur de fond. Il a pour objectif de saturer les réserves glycogéniques afin d'avoir une disponibilité optimale en glucose le jour de l'épreuve. On parle de « surcompensation glycogénique ». Le RDS est composé de deux phases distinctes [28] :

- **La phase de déplétion glycogénique** : cette phase dure 3 jours (de J-6 à J-4). Durant ces trois jours l'alimentation est composée uniquement de protéines et de lipides, les glucides étant exclus. Le but de cette phase est d'obtenir un taux de glycogène très faible, en adoptant un régime appauvri en glucides et en poursuivant les efforts physiques.
- **La phase de surcompensation glycogénique** : cette phase dure 3 jours (de J-3 à J-1). Durant ces trois jours, l'alimentation est composée en majorité de glucides. Il s'agit d'augmenter les réserves glycogéniques, en adoptant un régime à base de glucides et en restreignant les activités physiques.

Lundi (J-6)	Mardi (J-5)	Mercredi (J-4)	Jeudi (J-3)	Vendredi (J-2)	Samedi (J-1)
Footing (40 minutes) + 2 x 10 km allure marathon + Récupération 20 minutes	Footing (50 minutes) + 10 minutes allure marathon + 5 sprints + Récupération 10 minutes	Repos	Footing à jeun (30 à 40 minutes) + 6 x 20/20s	Repos	Léger footing (20 à 30 minutes)

Plan d'entraînement en adéquation avec le RDS, en amont d'une compétition sportive

	Lundi (J-6)	Mardi (J-5)	Mercredi (J-4)	Jeudi (J-3)	Vendredi (J-2)	Samedi (J-1)
Petit déjeuner	Œufs, jambon, fromage blanc Thé			Pain confiture, miel, gâteau sec, fruits secs Thé sucré	Pain complet + confiture, miel Thé + fructose	
Déjeuner	Salade fêta, Concombre, tomates Aiguillettes de poulet mariné + omelettes aux champignons	Crudités (tomates, laitue) + Huile de colza Côtes de porc, haricots verts Fromages	Crudités (choux) + Huile de noix Boudin noir + Champignons, Aubergines Fromages	Patates Poisson blanc Compote + pain d'épices	Pâtes complètes Blanc de poulet Bananes + pain d'épice maison	Riz Poisson Bananes
Dîner	Cake à la courgette Tomates farcies à la viande Salade de fruits	Crevettes + Radis noir + Huile d'olive Saumon + Épinards Petits suisses	Asperges + Crevette + Huile de colza Sardines + Céleri Fromage blanc	Riz Veau Compote + pain d'épices	Blé Filet de poisson papillote Compote + pain d'épice maison	Pâtes Blanc de poulet Gâteaux secs

Plan de nutrition en adéquation avec le RDS en amont d'une compétition sportive

Une étude menée par l'équipe du Docteur Sherman a comparé l'impact de trois régimes glucidiques différents sur la performance d'un semi-marathon. Les trois régimes glucidiques sont les suivants : 15% de glucides/jour (régime L), 50 % de glucides/jour (régime M), 70% de glucides/jour (régime H). L'étude a comparé l'impact de ces trois régimes sur le semi-marathon, grâce à trois essais différents [56]:

- Essai N°1 : régime L pendant 3 jours, suivi d'un régime H pendant 3 jours
- Essai N°2 : régime M pendant 3 jours, suivi d'un régime H pendant 3 jours
- Essai N°3 : régime M pendant 6 jours

Durant les 6 jours d'essai, un exercice par jour à 73% de la VO₂max a été réalisé et une biopsie musculaire a été réalisée le cinquième jour : avant et après l'exercice. Les résultats de cette étude montrent que les essais N°1, 2 et 3 ont augmenté respectivement les taux de glycogène musculaire à 207, 203 et 159 mmol de glucose/kg de muscle. De plus les essais N°1 et 2 ont consommé significativement plus de glucose que l'essai N°3 : 5,1 mmol de glucose/km (essais N°1 et 2) contre 3,1 mmol de glucose/km (essai N°3). De plus, il a été démontré qu'il n'existe pas de différence significative de temps de course entre les essais N°1 et 2. En conclusion, cette étude montre que :

- Le glycogène musculaire peut être amené à des concentrations élevées grâce à un régime hyperglucidique.
- Les niveaux initiaux de glycogène influencent la quantité utilisée pendant l'exercice.
- La déplétion en glucides en amont d'une surcompensation glucidique (schéma type du RDS) n'améliore pas la performance sur une course type semi-marathon.

De plus, le Régime Dissocié Scandinave est responsable de nombreux effets secondaires pouvant impacter la performance le jour du marathon, tels qu'une perte de poids, des troubles digestifs, de la fatigue, de la diarrhée, de l'anxiété, des troubles de l'humeur et du sommeil, des hypoglycémies ainsi qu'une carence en vitamine du groupe B. Pour ces raisons, le RDS n'est plus couramment conseillé.

On préfère recommander une alimentation standard durant l'entraînement à une course, suivie d'une alimentation hyperglucidique pendant les trois jours précédents la compétition. La proportion de glucides doit se situer entre 700 et 800 g/jour de glucides, ce qui représente 60 à 65 % de l'apport énergétique quotidien. Cette alimentation enrichie en glucides, permet d'augmenter de 90 % les réserves de glycogène musculaire avant une compétition.

4.2 L'emploi de compléments alimentaires non justifié : un danger

4.2.1 Règlements des compléments alimentaires

Dans notre société actuelle l'usage de compléments alimentaires s'est démocratisé, que ce soit chez des personnes sédentaires ou des sportifs. Une étude nommée INCA 3, a été menée par l'ANSES pendant la période de 2014 à 2015, sur l'évolution des habitudes et des modes de consommations des Français. Il ressort de cette étude, que 22 % des adultes consomment des compléments alimentaires, pendant une durée moyenne de quatre mois et demi par an. Les femmes, appartenant à la tranche d'âge 18-44 ans, sont les plus grandes consommatrices de compléments alimentaires, notamment durant la période hivernale. Il ressort également de cette étude que la plus grande part des compléments

alimentaires est achetée en pharmacie : 45% en 2015, contre 32% en 2007. Cependant l'achat sur internet s'est également fortement développé entre 2007 et 2015 ; on observe une augmentation de 1% à 11% [57].

Un complément alimentaire se définit par trois caractéristiques [57] :

- Il complète le régime alimentaire : il ne se substitue donc pas à une alimentation saine et variée quotidienne. Les apports nutritionnels s'ajoutent aux apports issus de l'alimentation courante, y compris à ceux provenant des aliments enrichis.
- Il est essentiellement formé d'ingrédients ayant un effet nutritionnel ou physiologique : les compléments alimentaires ne sont pas composés d'une matrice alimentaire, constituée de macronutriment (glucides, lipides, protéines)
- Il se présente sous forme de doses : il est défini par une unité de prise, qui est mesurable et de faible quantité, comparé aux quantités d'aliments consommées habituellement. L'autorité compétente fixe pour certaines substances une quantité requise pour obtenir l'effet recherché ; par exemple, la dose journalière recommandée de caféine ne doit pas dépasser 200 mg.

La commercialisation des compléments alimentaires représente un marché en expansion sur les scènes européenne et française. Il existe un grand risque de fraude, car de nombreux laboratoires lancent des produits contenant une substance active surdosée, sous dosée ou inexistante. Afin d'éviter de consommer des produits inefficaces ou même dangereux pour la santé, il est intéressant de connaître la réglementation autorisant la mise sur le marché de ces produits [45].

La mission de sécurité sanitaire des compléments alimentaires était auparavant sous l'égide de la Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes (DGCCRF). Depuis le 1^{er} janvier 2024, ses missions sont reprises par la Direction Générale de l'Alimentation du ministère de l'Agriculture. Cette autorité a la charge de l'enregistrement de la déclaration d'un complément alimentaire ainsi que des contrôles et de la conformité du produit suite à sa commercialisation. L'ANSES, quant à elle, recense le suivi des déclarations d'effets indésirables potentiellement liés au complément alimentaire.

Ainsi le cycle de vie d'un complément alimentaire est constitué de trois étapes [58] :

1. La déclaration : elle est envoyée aux autorités compétentes et doit comporter différentes informations, telles que :

- Le statut du déclarant, la nature de la déclaration (*1^{ère} déclaration, déclaration simplifiée, modification de déclaration*)
- La dénomination commerciale du produit, la marque, la gamme, la forme galénique et la population cible
- Le conditionnement, les recommandations d'emploi (*Dose Journalière Recommandée, mode d'emploi, consommation déconseillée, mises en gardes spéciales*)
- Liste des ingrédients actifs, autres ingrédients

La demande d'enregistrement doit s'accompagner de listes de pièces justificatives à fournir. Chaque année, environ 1 000 à 1 500 demandes d'enregistrement sont envoyées. Le complément alimentaire, n'étant pas un médicament et ne disposant pas d'une Autorisation de Mise sur le Marché (AMM), il ne doit pas avoir un étiquetage présentant des allégations de préventions, de traitement ou de guérison d'une pathologie.

2. Le contrôle : les compléments alimentaires sont soumis à des normes de qualités françaises et européennes. Suite à la commercialisation du produit, il peut y avoir des contrôles inopinés visant à vérifier la conformité :

- Des matières premières (dosage, importation)
- Des conditions de production (hygiène)
- Des critères microbiologiques, des contaminants chimiques
- De la traçabilité
- Des importations de matière première
- De l'étiquetage
- De l'information des consommateurs

3. La nutrivigilance : les effets indésirables susceptibles d'être liés à la consommation d'un complément alimentaire font l'objet d'un signalement par un professionnel de santé (médecin, pharmacien, sage-femme, masseur-kinésithérapeute). Les diététiciens, ainsi que les fabricants ou les distributeurs ayant remarqué un effet indésirable sur un produit sont également habilités à faire une déclaration de nutrivigilance. En cas d'imputabilité forte à un produit, l'ANSES alerte les autorités compétentes afin de procéder à un contrôle du produit, une modification de

l'étiquetage et si nécessaire un retrait. L'ANSES publie ponctuellement des avis publics afin de montrer des cas d'imputabilité et de sévérité élevés. Il existe de nombreux avis publiés sur des compléments alimentaires destinés au sportif [59].

La prise de compléments alimentaires ne respectant pas les normes françaises et européennes peut entraîner des risques pour la santé ou pour la performance du sportif. En effet, il peut y avoir tromperie sur le produit : le produit actif mentionné sur l'étiquetage n'est pas présent dans la composition ou remplacé par une substance active moins onéreuse. On peut mentionner le cas de la myrtille, fruit antioxydant, remplacé par du sureau, qui est beaucoup moins onéreux et dépourvu de propriétés antioxydantes. Les risques pour la santé du sportif sont également existants : présence d'une substance dangereuse (quelle que soit la dose), dose trop élevée d'un produit initialement inoffensif, présence d'impuretés liée à un manque d'hygiène lors de la production (plomb, éclats de verre, déjections animales). Hormis ces risques pour la santé du sportif, il y a également des risques pour sa performance:

- Consommation de certaines substances en quantité trop importante, qui va produire des effets inverses à ceux escomptés (tels que les antioxydants)
- Contamination du complément alimentaire par un produit illicite (tel que la testostérone), qui entraîne un contrôle anti-dopage positif. Les catégories de substances interdites sont mentionnées dans le paragraphe 3.2.1 : il s'agit du groupe D.

Ainsi, l'utilisation aveugle de compléments alimentaires doit être évitée au maximum : il faut avoir un regard critique sur l'origine de ces compléments. Quelques consignes élémentaires devraient être respectées par chaque athlète [45] :

- Effectuer un bilan nutritionnel complet, avant toute supplémentation
- Demander conseil à un professionnel de santé
- Choisir des compléments alimentaires, avec un label antidopage de préférence
- Privilégier les filières de vente sécurisées (laboratoire connus), éviter les produits vendus sur internet
- Privilégier les compléments alimentaires soumis à la législation européenne
- Respecter les conditions d'utilisation (âge, durée, doses, posologies, ...)
- Avoir conscience que ce qui est noté sur l'emballage, n'est pas forcément le reflet de la composition du complément alimentaire (absence de produit actif, présence de substance interdite non mentionnée, allégations nutritionnelles non vérifiées) notamment si le produit est d'une origine non déterminée.

4.2.2 Les compléments alimentaires néfastes pour la santé

Une étude réalisée entre 2016 et 2023 par une équipe de l'Institut de médecine légale de Strasbourg a recherché une éventuelle contamination de compléments alimentaires à la demande d'avocats de sportifs. En effet, les athlètes sont soumis à des contrôles antidopages réguliers. Lorsque le test est positif, deux interprétations sont possibles : la fin de l'excrétion urinaire d'un agent utilisé pour se doper ou la conséquence d'une contamination par un complément. L'objectif de cette étude était de déterminer s'il y avait une présence de substances interdites inscrites sur la liste de l'Agence Mondiale Antidopage (AMA) dans les compléments alimentaires sélectionnés. Pour réaliser cette étude, 310 échantillons ont été sélectionnés et analysés sur la période de 2016 à 2023. Les résultats montrent que parmi ces échantillons 41% se sont révélés positifs à une substance interdite par l'AMA, 11 molécules différentes ont été incriminées que l'on peut répartir en cinq catégories [60] :

- Modulateurs métaboliques
- Stéroïdes anabolisants
- Autres agents anabolisants
- Stimulants
- β 2-agonistes

Ces différentes catégories sont présentées en détail ci-dessous [61].

1) Les modulateurs métaboliques

- *Molécules* : Cardarine, Trimétazidine
- *Interdiction par l'AMA* : En permanence
- Ils représentent 51 % des contaminations de l'étude

Les modulateurs métaboliques incluent une série de substances influençant l'action des hormones en bloquant ou en stimulant des récepteurs spécifiques et en accélérant ou en ralentissant certaines réactions enzymatiques.

- *Effets indésirables* : bouffées de chaleur, fatigue, éruption cutanée, nausées, risque accru de thrombose

2) Les stéroïdes anabolisants / autres agents anabolisants

- *Molécules* : méthandiénone, oxandrolone, méthélone
- *Interdiction par l'AMA* : En permanence

- Ils représentent 17 % des contaminations de l'étude

Ils permettent principalement d'augmenter la masse et la puissance musculaires. Ils inhibent également la dégradation musculaire suite à un effort, ce qui permet une meilleure récupération.

- *Effets indésirables* : sautes d'humeur importantes, comportement irrationnel, augmentation de l'agressivité, irritabilité, dépression, développement d'athérosclérose

3) Les stimulants

- *Molécules* : méthylhexenamine, diméthylbutynamine
- *Interdiction par l'AMA* : en compétition uniquement
- Ils représentent 12 % des contaminations de l'étude

Les stimulants permettent à l'athlète d'augmenter l'activité physique et intellectuelle. En effet, ils éliminent la sensation de fatigue, améliorent le moral et augmentent la capacité de performance en dilatant les bronches, en favorisant une vasoconstriction et l'augmentation de la fréquence cardiaque.

- *Effets indésirables* : hyperexcitation, agressivité excessive, hallucinations, angoisses, dépression, hypertension artérielle, troubles du rythme cardiaque.

4) Les β_2 agonistes

- *Molécules* : higenamine
- *Interdiction par l'AMA* : en permanence
- Ils représentent 7 % des contaminations de l'étude

Les β_2 agonistes stimulent l'action de la noradrénaline et de l'adrénaline. Ils augmentent les performances physiques, notamment en dilatant les bronches, ce qui améliore la respiration. Ils peuvent se prendre par voie orale ou en inhalation. Ils permettent également de stimuler la synthèse protéique et ont un effet catabolique sur les graisses.

Les β_2 agonistes sont utilisés à des fins thérapeutiques pour soigner l'asthme. Cette maladie étant répandue dans le monde du sport, l'arrêt d'un traitement antiasthmatique chez un athlète n'est pas possible. À ce titre, seules quatre molécules sont autorisées lors de compétition : le salbutamol inhalé (1600 $\mu\text{g}/24\text{h}$ max), le formotérol inhalé (54 $\mu\text{g}/24\text{h}$ max), le salmétérol inhalé (800 $\mu\text{g}/24\text{h}$ max) et le vilantérol inhalé (25 $\mu\text{g}/24\text{h}$ max).

- *Effets indésirables* : tachycardie, transpiration excessive, hyperglycémie, risques d'angine de poitrine et d'arythmie

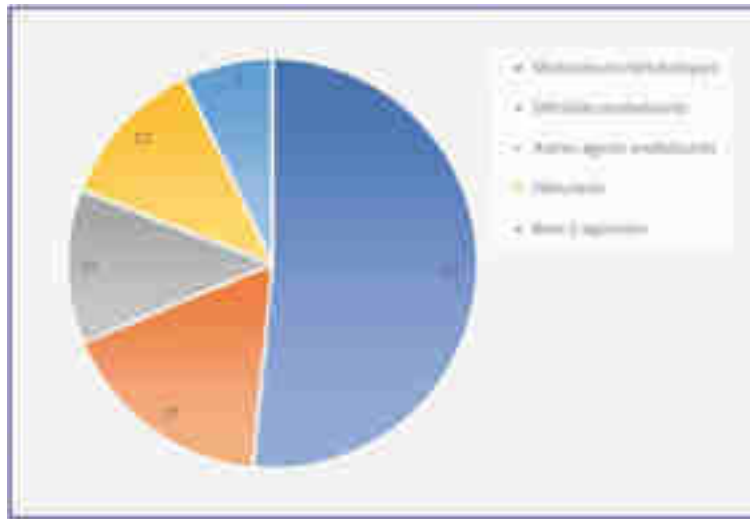


Figure 45 : Catégorisation des substances interdites par l'AMA [45]

Conclusion

Le marathon est une épreuve d'endurance courue à une intensité élevée, c'est à dire entre 75 % et 84 % de la VMA. Durant les 8 à 12 semaines précédant le marathon, il est important de mettre en place un programme d'entraînement composé de séances de fractionnés, d'endurance fondamentale et de longue distance. Pendant cette période, la balance énergétique ne doit pas être déséquilibrée. Il faut augmenter les apports énergétiques pour compenser les dépenses. L'alimentation du sportif doit donc se composer principalement : de glucides (55% de l'AET), de lipides (35% de l'AET) et de protéines (10% de l'AET). Les glucides sont majoritaires dans l'alimentation du sportif, car ils sont utilisés en grande quantité pendant un effort physique. En effet, les glucides ainsi que leurs réserves sont rapidement et facilement mobilisables, mais surtout ils apportent beaucoup d'énergie pendant l'effort.

Le corps humain utilise différents macronutriments en fonction de la durée de l'effort et de l'intensité. Lors d'une course de courte durée (inférieure à 90 minutes) ou d'intensité élevée (supérieure à 65% de la VMA), comme une séance de fractionnés, les glucides sont le principal pourvoyeur d'énergie. A l'inverse, lors d'une course d'intensité faible (inférieure à 65 % de la VMA), comme une séance en endurance fondamentale, les lipides sont majoritairement utilisés par l'organisme pour créer de l'énergie. Il peut alors être intéressant de réaliser la séance à jeun afin de stimuler l'oxydation des

lipides. Ces derniers sont présents en grande quantité dans l'organisme et fournissent aussi beaucoup d'énergie, mais ils ne sont pas aussi rapidement mobilisables que les glucides.

Au cours de la période d'entraînement, il est important d'adapter sa nutrition à la séance d'entraînement prévue dans la journée. Il s'agit de respecter la diversification alimentaire : l'équilibre des différentes catégories d'aliments (viandes, poissons, légumes, fruit) et la variété des aliments au sein d'une même catégorie (différents légumes et fruits). Durant les trois jours précédents la course, il est conseillé au sportif de charger son alimentation en glucides et en composés digeste afin d'éviter tout inconfort digestif. Pendant toute la durée du marathon, il est important de consommer des glucides sous forme liquide de préférence. L'apport glucidique doit être compris entre 60 g/h et 80 g/h, soit environ 350 ml toutes les 15 minutes. Pour le marathon, l'apport d'aliments solides est optionnel : si le besoin se fait ressentir il peut être intéressant de consommer des barres et des gels énergétiques ou encore des fruits secs. En période de récupération d'un effort, il est important de consommer des glucides afin d'en restocker le plus rapidement possible, pour pouvoir enchaîner sur un nouvel effort dans les jours qui suivent. Durant la récupération, une supplémentation en protéines est intéressante afin d'augmenter la vitesse de restockage du glucose et de réparer les fibres musculaires lésées durant l'effort.

L'optimisation de la performance lors d'un marathon n'est pas uniquement liée aux glucides, aux lipides et aux protéines. En effet certains micronutriments et oligo-éléments sont indispensables à la pratique sportive : il s'agit des vitamines du groupe B (B1, B2, B3 et B6) et des minéraux anti-oxydants (zinc, cuivre). Ces micronutriments sont présents dans l'alimentation quotidienne : une nutrition diversifiée et en quantité suffisante satisfait les besoins de l'organisme. Cependant certains sportifs consomment sans avis médical des compléments alimentaires afin de pallier ou de prévenir de potentielles carences. Il est important pour un sportif d'être vigilant quant à la provenance de ces compléments alimentaires, car ils peuvent contenir des substances interdites en compétition et être considérées comme substances dopantes ; celle-ci peuvent surtout être dangereuses pour la santé et provoquer par exemple des troubles psychiques, cardiaques ou endocriniens.

La nutrition du marathonien est donc l'un des piliers de l'optimisation de la performance : une nutrition variée et équilibrée composée en majorité de glucides, avec un apport adéquat en lipides et en protéines permet au maximum d'éviter les carences. Cependant la nutrition du coureur ne doit pas être sujette à des restrictions alimentaires particulières, ni à des produits se substituant à une alimentation saine et diversifiée. Parmi ces derniers, certains sont considérés comme des substances dopantes et interdites en compétition. Face à l'essor du dopage chez les athlètes professionnels, quels sont les outils des autorités compétentes pour juguler ce phénomène ?

Annexe 1 : Exemples de petit déjeuner lors de la préparation à un marathon [62]

	Aliments	50 kg	70 kg
PETIT DEJEUNER N°1	Eau	1 verre	1 verre
	Thé vert ou café	1 tasse	1 tasse
	Pain au levain	70 g	100 g
	Jambon cuit	20 g	30 g
	Fruit frais	100 g	130 g
	Amande	20 g	20 g
	Beurre	10 g	10 g
	TOTAL	50 g de glucides + 15 g de protéines	70 g de glucides + 21 g de protéines
PETIT DEJEUNER N°2	Eau	1 verre	1 verre
	Thé vert ou café	1 tasse	1 tasse
	Muesli maison	60 g	70 g
	Lait ou lait de soja enrichi en calcium	150 ml	250 ml
	Fruit frais	60 g	70g
	TOTAL	50 g de glucides + 14 g de protéines	70 g de glucides + 18 g de protéines

	Aliments	50 kg	70 kg
PETIT DEJEUNER N°3	Eau	1 verre	1 verre
	Thé vert ou café	1 tasse	1 tasse
	Pain au levain	60 g	80 g
	Œuf (riche en oméga-3) au plat	1 œuf	1 œuf
	Fruit frais	100 g	150 g
	Amandes et noisettes	20 g	30 g
	Yaourt	1 yaourt	1 yaourt
	TOTAL	50 g de glucides + 18 g de protéines	70 g de glucides + 21 g de protéines
PETIT DEJEUNER N°4	Eau	1 verre	1 verre
	Thé vert ou café	1 tasse	1 tasse
	Compote de pomme	60 g	100 g
	Fromage blanc	55 g	70 g
	Flocons d'avoine	30 g	50 g
	Figues sèches	20 g	30 g
	TOTAL	50 g de glucides + 12 g de protéines	75 g de glucides + 18 g de protéines

	Aliments	50 kg	70 kg
PETIT DEJEUNER N°5	Eau	1 verre	1 verre
	Thé vert ou café	1 tasse	1 tasse
	Gâteau de récupération	110 g	140 g
	Yaourt ou lait fermenté	1 pot	1 pot
	TOTAL	50 g de glucides + 12 g de protéines	70 g de glucides + 16 g de protéines
PETIT DEJEUNER N°6	Eau	1 verre	1 verre
	Thé vert ou café	1 tasse	1 tasse
	Saumon cru, mariné ou fumé	30 g	45 g
	Jus de citron	5 ml	5 ml
	Pain au levain	60 g	90 g
	Beurre	5 g	5 g
	Amandes	20 g	20 g
	Fruit frais	150 g	200 g
	TOTAL	50 g de glucides + 16 g de protéines	70 g de glucides + 23 g de protéines

Annexe 2 : Exemples de menus quotidiens [62]

MENU N°1	Aliments	50 kg	70 kg
Petit déjeuner	Voir Annexe 1		
Déjeuner	Salade verte	50 g	70 g
	Filet mignon de porc	80 g	100 g
	Julienne de légumes	180 g	250 g
	Patates douces	225 g	300 g
	Ananas et fruit de saison ou salade de fruit	60 g d'ananas / 100 g de fruit de saison	80 g d'ananas / 120 g de fruit de saison
Diner	Salade composée	150 g	250 g
	Œuf au plat	50 g (1 œuf)	100 g (2 œufs)
	Tomates provençales	200 g	300 g
	Haricots rouges	200 g	250 g
	Lait fermenté ou yaourt	125 g (1 pot)	125 g (1 pot)
	Fruit de saison ou salade de fruits	200 g	250 g
Ration d'entraînement	Boisson d'effort	500 ml (36 - 48 g de glucides)	
Ration de récupération	Voir 2.2.3 En récupération		
TOTAL		315 g de glucides + 84 g de protéines	420 g de glucides + 114 g de protéines

MENU N°2	Aliments	50 kg	70 kg
Petit déjeuner	Voir Annexe 1		
Déjeuner	Avocat	100 g	150 g
	Saumon cru	80 g	120 g
	Tomates et concombre	25 g de chaque	50 g de chaque
	Riz basmati	80 g (pesé cru)	100 g (pesé cru)
	Raisins secs, citron et fruit de la passion	25 g de raisins secs / jus de citron / 35 g de fruit de la passion	35 g de raisins secs / jus de citron / 50 g de fruit de la passion
Diner	Salade composée	150 g	250 g
	Escalope de dinde	70 g	100 g
	Poivrons grillés et coulis de tomates	120 g de poivrons / 120 g de tomates	180 g de poivrons / 180 de tomates
	Pâtes complètes	80 g (pesées crues)	100 g (pesées crues)
	Lait fermenté ou yaourt	125 g (1 pot)	125 g (1 pot)
	Fruit de saison ou salade de fruits	150 g	250 g
Ration d'entraînement	Boisson d'effort	500 ml (36 - 48 g de glucides)	
Ration de récupération	Voir 2.2.3 En récupération		
TOTAL		320 g de glucides + 84 de protéines	420 g de glucides +114 g de protéines

MENU N°3	Aliments	50 kg	70 kg
Petit déjeuner	Voir Annexe 1		
Déjeuner	Gaspacho	200 g	250 g
	Bavette de bœuf	70 g	100 g
	Haricots verts	120 g	200 g
	Patates douces	200 g	275 g
	Fruit de saison ou salade de fruit	200 g	250 g
Dîner	Salade verte et carottes râpées	30 g de salade verte / 80 g de carottes râpées	50 g de salade verte / 100 g de carottes râpées
	Cabillaud	40 g	50 g
	Brocolis et confits d'oignons	150 g de brocolis / 60g d'oignons	250 g de brocolis / 100 g de confit d'oignons
	Lentilles	50 g (pesées crues)	70 g (pesées crues)
	Lait fermenté ou yaourt	125 g (1 pot)	125 g (1 pot)
	Fruit de saison ou salade de fruits	250 g	250 g
Ration d'entraînement	Boisson d'effort	500 ml (36 - 48 g de glucides)	
Ration de récupération	Voir 2.2.3 En récupération		
TOTAL		315 g de glucides + 81 de protéines	410 g de glucides +114 g de protéines

Références bibliographiques

- [1] Lunzenfichter Alain, De Marathon au Marathon : 2500 ans de marathon (-490-2010), Atlantica, 3^{ème} édition, 2010
- [2] Larousse, Définition : Marathon, consulté le 7 janvier 2023, Disponible sur : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/marathon/49344>
- [3] Jens Jakob Andersen, The State of Running 2019, Septembre 2021, consulté le 15 janvier 2023, Disponible sur : <https://runrepeat.com/state-of-running>
- [4] Fabrice Favret, Évaluation des qualités aérobies : transport de l’oxygène, Cours magistral dispensé le 19 septembre 2022
- [5] Basset D, Edward Jr, Howley T, Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance, Medicine and Science in Sports and Exercise, Janvier 2000
- [6] Rivière D, Rochcongar P, Amoretti R, Bigard X, Lecocq J, et al, Médecin du sport pour le praticien, p 49, Elsevier Masson, 2020
- [7] Bigard Xavier, La nutrition du sportif, Elsevier Masson, 3^{ème} édition, 2017
- [8] Haugen T, Sandbakk O, Seiler S, Tonnessen E, The Training Characteristics of World-Class Distance Runners : An Integration of Scientific Literature and Results-Proven Practice, Avril 2022
- [9] Billat V, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralssetin JP, Validation d’une épreuve maximale à VMA et à VO2 max, Science et Sport, Volume 9, p135-143, 1994
- [10] Honthâas Ch, Ritz P., La dépense énergétique : mode d’emploi, Masson Paris, Annales d’endocrinologie, 2002
- [11] Billat V, Physiologie et Méthodologie de l’entraînement, De boeck Supérieur, 4^{ème} édition, 2017
- [12] Christophe Hausswirth, Jeanick Brisswalter. Le coût énergétique de la course à pied de durée pro- longée : étude des paramètres d’influence. Science & Sports, 1999, 14 (2), pp.59 - 70.
- [13] Léger L, Dépense énergétique sur tapis roulant – Une recension des écrits, Medicine and Science in Sports and Exercise, Mai 1997
- [14] Disse E, Laville M, Seyssel K, La régulation neuro-hormonale de la prise alimentaire, Janvier 2016

- [15] Lucquet S, Food intake regulation, Nutrition Clinique et Métabolisme, Volume 22, Juin 2008
- [16] Sim A.Y, Wallman KE, Fairchild TJ, Guelfi KJ, High-intensity intermittent exercise attenuates ad-libitum energy intake, International Journal of Obesity, Juin 2013
- [17] Siret C, Les composants chimiques alimentaires, Janvier 2018
- [18] Médart J, Manuel pratique de nutrition, De Boeck, 2^{ème} édition, 2009
- [19] Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments, Glucides et santé : Etats des lieux, Evaluation et recommandations, Octobre 2004
- [20] ANSES, Actualisation des apports nutritionnels conseillés pour les acides gras, Mai 2011
- [21] Simopoulos A, An Increase in the Omega-6/Omega-3 Fatty Acid Ratio Increases the Risk for Obesity, Mars 2016
- [22] ANSES, Les lipides, consulté le 25 juillet 2023, Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/les-lipides>
- [23] Endocrinologie : Aptitude au sport chez l'adulte et l'enfant. Besoins nutritionnels chez le sportif. Consulté le 30 juillet 2023. Disponible sur : <https://sides.uness.fr/corpus/>
- [24] ANSES, Les protéines, consulté le 3 août 2023, Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/les-protéines>
- [25] ANSES, Actualisation des repères du PNNS : élaboration des références nutritionnelles, Décembre 2016
- [26] Tomé D, Besoins en protéines et en acides aminés & qualités des protéines alimentaires, 2009
- [27] Ciqual, ANSES « Table de composition nutritionnelle des aliments » Consulté le 25 novembre 2023, Disponible sur : <https://ciqual.anses.fr>
- [28] Aubineau N, Truel A, Trail Coaching Nutrition, Avril 2017
- [29] Bigard X, Sport amateur, Sport de Loisir et santé, La revue du praticien, Volume 70, Mai 2020
- [30] Real E, Kilhoffer-Haiech M.C, Schneider C, Les glucides, UE7 Interrelations métaboliques, Mars 2017, Strasbourg
- [31] Dr Séronie-Vivien S, Biochimie-Biologie Moléculaire, Manuel de préparation au concours, Version du 21 juin 2015
- [32] Banque de Schémas, Académie de Dijon, Consulté le 23 août 2023, Disponible sur : <http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/spip.php?article1219>

- [33] Simon Matthieu, Cours Pharmacie « Chaîne respiratoire et phosphorylation oxydative », Consulté le 25 août 2023, Disponible sur : <https://www.cours-pharmacie.com/biochimie/chaine-respiratoire-et-phosphorylation-oxydative.html>
- [34] Burillard L, Daumas V, Glaz M, Lobrot S, Logier D, Maillot N et al, Les fermentations alimentaires, Agronomie, Université de Lorraine, 2015-2016
- [35] Léger L, Cazorla G, Petibois C, Bosquet L, Lactate et exercices : mythes et réalités, Staps 2001/1, N°54, p 63-76
- [36] Brooks G, The Science and Translation of Lactate Shuttle Theory, Cell Metabolism Review, Avril 2018, N°27, p757-785
- [37] Real E, Kilhoffer-Haiech M.C, Schneider C, Les lipides, UE7 Interrelations métaboliques, Mars 2017, Strasbourg
- [38] Demizieux L, Contrôle et régulation de l'oxydation mitochondriale des acides gras à longue chaîne, Journal de la Société de Biologie, 2005, p143-155
- [39] Jeppesen J, Kiens B, Regulation and limitations to fatty acid oxidation during exercise, Symposium review, The Journal of Physiology, Janvier 2012, N°590, p1059-1068
- [40] Purdom T, Kravitz L, Dokladny K, Mermier C, Understanding the factors that affect maximal fat oxidation, Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2018, N°15 :3
- [41] Marquet LA, et al, Enhanced Endurance Performance by Periodization of Carbohydrate Intake: "Sleep Low" Strategy, Official Journal of the American College of Sports Medicine, Octobre 2015
- [42] Rothschild J, Kilding A, Plews D, What Should I eat before Exercise? Pre-Exercise Nutrition and the Response to Endurance Exercise: Current Prospective and Future Directions, Nutrients Review, Octobre 2020, N°3473
- [43] Kerksick et al, International society of sports nutrition position stand: nutrient timing, International society of sports nutrition position stand: nutrient timing, Journal of the International Society of Sports Nutrition, Avril 2022, N°14:1
- [44] Costa R, Hoffman M, Knechtle B, Tarnopolsky M, Nutrition for Ultramarathon Running: Trail, Track and Road, International Journal of Sport Nutrition and Exercise Metabolism, 2019, N°29, p130-140
- [45] Hausswirth C, « Nutrition et performance en sport, la science au bout de la fourchette », INSEP, 2000
- [46] Gouello JP, « L'hydratation du marathonien : Vérités et contre-vérités », L'hydratation du marathonien, septembre 2011

- [47] Sicard J, « L'hydratation, au cœur de la stratégie nutritionnelle du sportif », Actualités pharmaceutiques, N°575, Avril 2018
- [48] VIDAL, Les sels minéraux et les oligoéléments, consulté le 6 février 2024, Disponible sur <https://www.vidal.fr/sante/nutrition/corps-aliments/sels-mineraux-oligoelements.html>
- [49] ANSES, Présentation des vitamines, Consulté le 6 février 2024, Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/que-sont-les-vitamines>
- [50] ANSES, Les références nutritionnelles en vitamines et minéraux, Consulté le 14 février, Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/les-references-nutritionnelles-en-vitamines-et-mineraux>
- [51] Australian Government, Australian Sports Commission, Supplements, Consulté le 21 février 2024, Disponible sur : <https://www.ais.gov.au/nutrition/supplements>
- [52] Filaire E, Rouveix M, Bouget M, Pannafieux C, Prévalence des troubles du comportement alimentaire chez le sportif, Science & Sport, Mars 2007
- [53] Kuhn F, Daniel H, Le régime cétogène pour les sportifs, Thierry Souccar Editions, Janvier 2021
- [54] Aubineau N, Eemples de menus cétogène, La nutrition du sport, Consulté le 3 avril 2024, Disponible sur : <https://www.nicolas-aubineau.com/menu-cetogene>
- [55] Service Public d'Information en Santé, « Que penser du régime cétogène ? », Consulté le 3 avril 2024, Disponible sur : <https://www.sante.fr/decryptage/nos-reponses/que-penser-du-regime-cetogene>
- [56] Sherman W.M, Costill D.L, Fink W.J, Miller J.M, Effect of Exercise-Diet Manipulation on Muscle Glycogen and Its subsequent Utilization During Performance, Sports Medicine, 1981
- [57] ANSES, INCA 3 : Evolution des habitudes et modes de consommation, de nouveaux enjeux en matière de sécurité sanitaire et de nutrition, Consulté le 9 avril 2024, Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/inca-3-evolution-des-habitudes-et-modes-de-consommation-de-nouveaux-enjeux-en-matiere-de>
- [58] Economie.gouv, Compléments alimentaires – Présentation générale, Consulté le 9 avril 2024, Disponible sur <https://www.economie.gouv.fr/dgccrf/securite/produits-alimentaires/complements-alimentaires#0>
- [59] ANSES, La nutrivigilance, Consulté le 9 avril 2024, Disponible sur : <https://www.anses.fr/fr/content/tout-savoir-sur-le-dispositif-de-nutrivigilance>
- [60] Feisthauser E, Gheddar L, Raul J.S et al, Contamination de compléments alimentaires utilisés par des athlètes, Toxicologie Analytique & Clinique, Septembre 2023

[61] Swiss Sport Integrity, Liste des Interdictions, Consulté le 10 avril 2024, Disponible sur : <https://www.sportintegrity.ch/fr/antidopage/droit/liste-des-interdictions>

[62] Daniel H, Kuhn F, Nutrition de l'endurance, Thierry Souccar Editions, Novembre 2012

ROLES ET ENJEUX DE LA NUTRITION CHEZ LE SPORTIF AU COURS DE LA PREPARATION D'UNE COMPETITION SPORTIVE : CAS DU MARATHON

Le marathon est une épreuve sportive d'une distance de 42,195 kilomètres qui a été créée à l'occasion de la réédition des Jeux Olympiques de 1896 à Athènes. Outre les athlètes professionnels, la course à pied est pratiquée par des millions de personnes dans le monde entier ; il s'agit d'un sport populaire et facile d'accès. La performance lors d'un marathon passe par un entraînement ciblé, un sommeil récupérateur et une nutrition adaptée. En effet, durant la période d'entraînement, il est important de consommer des glucides en priorité : ils sont rapidement disponibles et peuvent être stockés en grande quantité dans le muscle. Puis le jour de la course, la dépense énergétique étant très élevée, il est nécessaire d'avoir un apport glucidique important, principalement sous forme de boissons d'effort. Enfin, pendant la période de récupération d'un entraînement ou d'un marathon, il est bon de reconstituer les réserves de glucides qui ont été épuisées. En complément de la nutrition, le domaine de l'hydratation joue un rôle capital dans l'optimisation de la performance. Que ce soit en période d'entraînement, pendant la course ou en récupération, il existe plusieurs types d'eau avec une composition adaptée aux besoins du coureur. La nutrition et l'hydratation du sportif doivent être équilibrées et variées afin d'éviter toute dérive, comme les régimes restrictifs ou l'utilisation abusive de compléments alimentaires.

The marathon is a sporting event covering a distance of 42.195 kilometers, created for the revival of the Olympic Games in 1896 in Athens. Besides professional athletes, running is practiced by millions of people worldwide; it is a popular and accessible sport. Performance in a marathon relies on targeted training, restorative sleep, and appropriate nutrition. During the training period, it is crucial to prioritize the consumption of carbohydrates : they are quickly available and can be stored in large quantities in the muscles. On race day, as energy expenditure is very high, it is essential to have a significant carbohydrate intake, mainly in the form of energy drinks. Finally, during the recovery period after training or a marathon, it is important to replenish the depleted carbohydrate reserves. In addition to nutrition, hydration plays a key role in optimizing performance. Whether during training, the race, or recovery, there are several types of water with compositions tailored to the runner's needs. The athlete's nutrition and hydration should be balanced and varied to avoid any pitfalls, such as restrictive diets or the excessive use of dietary supplements.