

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

**Soutenue publiquement le 14 mai 2014
Par M. OTT Thibault**

**Rôle du pharmacien d'officine
dans le conseil diététique du sportif
d'endurance**

Membres du jury :

Président : Monsieur DINE Thierry,
Professeur de pharmacie clinique, Faculté de Pharmacie, Université Lille 2.
Praticien hospitalier, Centre Hospitalier d'Haubourdin.

Assesseur : Monsieur KAMBIA Nicolas,
Maître de conférences en pharmacologie, Faculté de Pharmacie, Université Lille 2.

Membre extérieur : Monsieur KACZMAREK Thibaut,
Docteur en pharmacie, Laboratoire du Centre Oscar Lambret, Lille.



Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de Lille

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

☎ 03.20.96.40.40 - 📠 : 03.20.96.43.64



Université Lille 2
Droit et Santé

Université Lille 2 – Droit et Santé

Président :	Professeur Xavier VANDENDRIESSCHE
Vice- présidents :	Professeur Alain DUROCHER
	Professeur Régis BORDET
	Professeur Patrick PELAYO
	Professeur Frédéric LOBEZ
	Professeur Monique CAPRON
	Professeur Salem KACET
	Madame Stéphanie DAMAREY
	Monsieur Pierre RAVAUX
	Monsieur Larbi AIT-HENNANI
	Monsieur Edouard DANJOU
Directeur Général des Services :	Monsieur Pierre-Marie ROBERT

Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques

Doyen :	Professeur Luc DUBREUIL
Vice-Doyen, 1 ^{er} assesseur :	Professeur Damien CUNY
Assesseurs :	Mme Nadine ROGER
	Professeur Philippe CHAVATTE
Chef des services administratifs :	Monsieur André GENY

Liste des Professeurs des Universités :

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	ALIOUAT	El Moukhtar	Parasitologie
Mme	AZAROUAL	Nathalie	Physique
M.	BAILLEUL	François	Pharmacognosie
M.	BERTHELOT	Pascal	Chimie Thérapeutique 1
M.	CAZIN	Jean-Louis	Pharmacologie – Pharmacie clinique
M.	CHAVATTE	Philippe	Chimie Thérapeutique 2
M.	COURTECUISSÉ	Régis	Sciences végétales et fongiques
M.	CUNY	Damien	Sciences végétales et fongiques
Mme	DELBAERE	Stéphanie	Physique
M.	DEPREZ	Benoît	Chimie Générale
Mme	DEPREZ	Rebecca	Chimie Générale
M.	DUPONT	Frédéric	Sciences végétales et fongiques
M.	DURIEZ	Patrick	Physiologie
M.	GARÇON	Guillaume	Toxicologie
Mlle	GAYOT	Anne	Pharmacotechnie Industrielle
M.	GESQUIERE	Jean-Claude	Chimie Organique
M.	GOOSSENS	Jean François	Chimie Analytique
Mme	GRAS	Hélène	Chimie Thérapeutique 3
M.	LEMDANI	Mohamed	Biomathématiques
Mme	LESTAVEL	Sophie	Biologie Cellulaire

M.	LUC	Gerald	Physiologie
Mme	MELNYK	Patricia	Chimie thérapeutique 2
Mme	MUHR – TAILLEUX	Anne	Biochimie
Mme	PAUMELLE-LESTRELIN	Réjane	Biologie Cellulaire
Mme	PERROY – MAILLOLS	Anne Catherine	Droit et déontologie pharmaceutique
Mlle	ROMOND	Marie Bénédicte	Bactériologie
Mme	SAHPAZ	Sevser	Pharmacognosie
M.	SIEPMANN	Juergen	Pharmacotechnie Industrielle
M.	STAELS	Bart	Biologie Cellulaire
M	TARTAR	André	Chimie Organique
M.	VACCHER	Claude	Chimie Analytique

M.	MILLET	Régis	Chimie Thérapeutique (ICPAL)
----	--------	-------	------------------------------

Liste des Professeurs des Universités - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	BROUSSEAU	Thierry	Biochimie
M.	BRUNET	Claude	Pharmacologie
Mme	CAPRON	Monique	Immunologie
M.	DECAUDIN	Bertrand	Pharmacie Galénique
M.	DINE	Thierry	Pharmacie clinique
M.	DUBREUIL	Luc	Bactériologie
M.	DUTHILLEUL	Patrick	Hématologie
M.	GRESSIER	Bernard	Pharmacologie
M.	LUYCKX	Michel	Pharmacie clinique
M.	ODOU	Pascal	Pharmacie Galénique
M.	DEPREUX	Patrick	Chimie Organique (ICPAL)

Liste des Maitres de Conférences

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	AGOURIDAS	Laurence	Chimie thérapeutique 2
Mme	ALIOUAT	Cécile Marie	Parasitologie
Mme	AUMERCIER	Pierrette	Biochimie
Mme	BANTUBUNGI	Kadiombo	Biologie cellulaire
Mme	BARTHELEMY	Christine	Pharmacie Galénique
M.	BEGHYN	Terence	Chimie Thérapeutique 3
Mme	BEHRA	Josette	Bactériologie
M.	BERTHET	Jérôme	Physique
M.	BERTIN	Benjamin	Immunologie
M.	BLANCHEMAIN	Nicolas	Pharmacotechnie industrielle
M.	BOCHU	Christophe	Physique
M.	BRIAND	Olivier	Biochimie
Mme	CACHERA	Claude	Biochimie
M.	CARATO	Pascal	Chimie Thérapeutique 2
M.	CARNOY	Christophe	Immunologie
Mme	CARON	Sandrine	Biologie cellulaire
Mlle	CHABÉ	Magali	Parasitologie
Mlle	CHARTON	Julie	Chimie Organique
M	CHEVALIER	Dany	Toxicologie
M.	COCHELARD	Dominique	Biomathématiques
Mme	DANEL	Cécile	Chimie Analytique
Mme	DEMANCHE	Christine	Parasitologie
Mlle	DEMARQUILLY	Catherine	Biomathématiques
Melle	DUMONT	Julie	Biologie cellulaire

M.	FARCE	Amaury	Chimie Thérapeutique 2
Mlle	FLIPO	Marion	Chimie Organique
Mme	FOULON	Catherine	Chimie Analytique
Mme	GARAT	Anne	Toxicologie
M.	GELEZ	Philippe	Biomathématiques
M.	GERVOIS	Philippe	Biochimie
Mme	Article I. GRAVE	Béatrice	Toxicologie
Mme	GROSS	Barbara	Biochimie
Mme	HANNOTHIAUX	Marie-Hélène	Toxicologie
Mme	HELLEBOID	Audrey	Physiologie
M.	HENNEBELLE	Thierry	Pharmacognosie
M.	HERMANN	Emmanuel	Immunologie
M.	KAMBIA	Kpakpaga Nicolas	Pharmacologie
M.	KARROUT	Youness	Pharmacotechnie Industrielle
Mlle	LALLOYER	Fanny	Biochimie
M.	LEBEGUE	Nicolas	Chimie thérapeutique 1
Mlle	LEONHARD	Julie	Droit et déontologie pharmaceutique
Mme	LIPKA	Emmanuelle	Chimie Analytique
Mme	LORIN-LECOEUR	Marie	Chimie Analytique
Mme	MARTIN	Françoise	Physiologie
M.	MOREAU	Pierre Arthur	Sciences végétales et fongiques
M.	MOUTON	Nicolas	Physique
Mme	MUSCHERT	Susanne	Pharmacotechnie industrielle
Mme	NEUT	Christel	Bactériologie
Mme	PINÇON	Claire	Biomathématiques
M.	PIVA	Frank	Biochimie
Melle	PLATEL	Anne	Toxicologie
M.	RAVAUX	Pierre	Biomathématiques
Mme	RIVIERE	Céline	Pharmacognosie
Mme	ROGER	Nadine	Immunologie
M.	ROUMY	Vincent	Pharmacognosie
M.	SERGHERAERT	Eric	Droit et déontologie pharmaceutique
Mme	SIEPMANN	Florence	Pharmacotechnie Industrielle
Mlle	SINGER	Elisabeth	Bactériologie
Mme	STANDAERT	Annie	Parasitologie
M.	TAGZIRT	Madjid	Hématologie
Mme	THUILLIER	Pascale	Hématologie
Mme	VANHOUTTE	Geneviève	Biochimie
M.	WELTI	Stéphane	Sciences végétales et fongiques
M.	WILLAND	Nicolas	Chimie organique
M.	YOUS	Saïd	Chimie Thérapeutique 1
M.	FURMAN	Christophe	Pharmacobiochimie (ICPAL)
Mme	GOOSSENS	Laurence	Chimie Organique (ICPAL)

Liste des Maitres de Conférences - Praticiens Hospitaliers

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	ALLORGE	Delphine	Toxicologie
Mme	BALDUYCK	Malika	Biochimie
Mme	GOFFARD	Anne	Bactériologie
M.	LANNON	Damien	Pharmacie Galénique
Mme	ODOU	Marie Françoise	Bactériologie

Professeurs Agrégés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	MAYES	Martine	Anglais
M.	MORGENROTH	Thomas	Droit et déontologie pharmaceutique

Professeurs Certifiés

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	HUGES	Dominique	Anglais
Mlle	FAUQUANT	Soline	Anglais
M.	OSTYN	Gaël	Anglais

Professeurs Associé - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	ABADIE	Eric	Droit et déontologie pharmaceutique

Maîtres de Conférences ASSOCIES - mi-temps

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
Mme	BERTOUX	Elisabeth	Pharmacie Clinique - Biomathématiques
M.	BRICOTEAU	Didier	Biomathématiques
M.	FIEVET	Pierre	Information Médicale
M.	FRIMAT	Bruno	Pharmacie Clinique
M.	MASCAUT	Daniel	Pharmacie Clinique
M.	WATRELOS	Michel	Droit et déontologie pharmaceutique
M.	ZANETTI	Sébastien	Biomathématiques

AHU

Civ.	NOM	Prénom	Laboratoire
M.	SIMON	Nicolas	Pharmacie Galénique



Université Lille 2
Droit et Santé

Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de Lille

3, rue du Professeur Laguesse - B.P. 83 - 59006 LILLE CEDEX
Tel. : 03.20.96.40.40 - Télécopie : 03.20.96.43.64
<http://pharmacie.univ-lille2.fr>

L'Université n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses ; celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Remerciements

Au jury de thèse,

A Monsieur Thierry Dine,

Pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury et pour la qualité de vos enseignements le long de mon parcours universitaire. Recevez ici le témoignage de tout mon respect et de ma reconnaissance.

A Monsieur Nicolas Kambia,

Pour m'avoir fait l'honneur d'encadrer la réalisation de cette thèse. Je vous remercie pour vos conseils, vos encouragements et le temps que vous m'avez accordé pour la réalisation de mon travail. Soyez assuré de l'expression de ma profonde reconnaissance.

A Monsieur Thibaut Kaczmarek,

C'est avec beaucoup de plaisir que je te compte parmi les membres du jury. Tes conseils et ton expérience m'ont toujours été précieux tout au long de mes années de faculté. Permet-moi de t'exprimer ma plus profonde gratitude.

A ma famille,

A mes Parents,

Merci pour votre soutien et vos sacrifices qui m'ont permis de réaliser les études dont j'avais envie. Sans vous, je ne serais pas là. Merci pour votre amour et votre éducation. Merci d'avoir toujours cru en moi. Vous êtes des parents formidables, même si je ne le dit pas souvent, je vous aime.

A ma sœur Emeline,

Merci pour ta gentillesse et ta patience même si je ne suis pas toujours facile. Tu es une personne extraordinaire avec une personnalité forte et une grande sensibilité. Je serai toujours là pour toi. Je t'aime.

A ma famille,

Grands-pères, oncles, tantes, cousins, cousines...

Je vous remercie pour votre affection et tous les bons moments passés avec vous.

Avec une grosse pensée pour mes grands-mères Danielle et Odette, mon oncle Serge partis trop tôt.

A mes amis,

Merci pour votre présence pendant toutes ces années, dans les moments joyeux comme dans les périodes de doute. Merci d'être vous.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	10
PARTIE I : LE SPORTIF	11
I. GENERALITES SUR LE SPORT.....	11
A. Une société de plus en plus sédentaire	11
B. Effets bénéfiques du sport	12
C. Risques du sport.....	12
D. L'endurance.....	12
E. Quels sont les sports d'endurance ?	13
II. SYSTEME MUSCULAIRE.....	13
A. Généralités.....	13
B. Architecture du muscle squelettique	14
C. Contraction musculaire.....	19
D. Types de fibres musculaires	24
E. Voies énergétiques	26
III. SYSTEME CARDIO-PULMONAIRE	33
A. Système cardiovasculaire.....	33
B. Système respiratoire.....	41
IV. SYSTEME DIGESTIF.....	56
A. Le tube digestif.....	56
B. De la bouche à l'œsophage	57
C. L'estomac	57
D. L'intestin grêle	58
E. Le gros intestin.....	59
F. Le foie	59
G. La vésicule biliaire.....	60
H. Le pancréas.....	60
V. PHYSIOLOGIE DE LA DIGESTION	60
A. Intervention de stimulus nerveux	60
B. De la bouche à l'œsophage	61
C. L'estomac	62
D. L'intestin grêle dans la digestion.....	65
E. Rôle du pancréas.....	65
F. Rôle des acides biliaires	66
G. Rôle du côlon	67
PARTIE II : DEPENSES ENERGETIQUES ET NUTRITION.....	69
I. DEPENSES ENERGETIQUES	69
A. Généralités.....	69
B. Métabolisme de base et dépense énergétique de repos.....	69
C. Energie dépensée pour l'activité physique.....	69
D. Effet thermique des aliments	70
E. Autres.....	70
II. APPORTS EN ENERGIE	70
A. Teneur énergétique des aliments.....	70
B. Bilan énergétique	71
C. L'indice de masse corporelle (IMC).....	71
D. Calcul des dépenses énergétiques.....	72
III. LES NUTRIMENTS.....	74
A. Glucides	74
B. Lipides.....	85
C. Protéines	95
D. L'alcool	99
IV. VITAMINES	101
A. Rôles des vitamines	101
B. Groupes de vitamines.....	101
V. OLIGOELEMENTS ET MACROELEMENTS	104
VI. L'EAU	116

VII.	COMPOSITION DES ALIMENTS	119
VIII.	LA PYRAMIDE ALIMENTAIRE SUISSE	126
PARTIE III : ALIMENTATION DU SPORTIF D'ENDURANCE ET CONSEILS DU PHARMACIEN		135
I.	NUTRITION DU SPORTIF D'ENDURANCE	135
A.	<i>Glucides</i>	135
B.	<i>Lipides</i>	145
C.	<i>Protéines</i>	147
D.	<i>Micronutriments</i>	150
II.	EXEMPLES DE PRODUITS CONSEILS	151
A.	<i>Les compléments alimentaires</i>	151
B.	<i>Gamme EA FIT (laboratoire EA PHARMA)</i>	152
C.	<i>Gamme STC Nutrition (laboratoire INELDEA)</i>	164
III.	LIMITES AVEC LE DOPAGE	178
A.	<i>Généralités</i>	178
B.	<i>Définition du dopage</i>	179
C.	<i>Dopage et compléments alimentaires</i>	179
D.	<i>Substances interdites</i>	180
E.	<i>Exemples de dangers et d'effets indésirables des substances dopantes [110]</i>	187
F.	<i>Modes de consommation</i>	189
G.	<i>Dopage dans les sports d'endurance</i>	190
H.	<i>Epidémiologie</i>	190
CONCLUSION		192
BIBLIOGRAPHIE		194

Introduction

Parmi les professionnels de santé, le pharmacien est sans doute le plus disponible et le plus facilement accessible. Tous les jours, des centaines de personnes se rendent à l'officine avec des profils très variés.

Par sa polyvalence, il doit donc pouvoir s'adapter à chaque personnalité, à chaque demande, à chaque besoin.

Un sportif peut donc franchir les portes d'une officine pour y demander des conseils en rapport avec son activité physique pour améliorer ses performances, sa récupération et lui apporter des informations sur ses pathologies (tendinites, déchirures, orthèses...).

Nous avons choisi de traiter la diététique du sportif d'endurance car je pense que cela concerne une plus grande partie de la population à travers une large gamme de sports.

Les sports d'endurance nécessitent une grande préparation physique, mais la diététique est souvent négligée alors qu'elle est un des points essentiels de la performance.

Le pharmacien doit donc connaître la physiologie du sportif, ses différents besoins énergétiques ainsi que la diététique adaptée. En effet, de nombreux compléments alimentaires sont disponibles en magasins spécialisés mais souvent avec des conseils inappropriés ou avec du personnel peu qualifié.

Lors de cette thèse, nous ferons dans un premier temps quelques rappels sur la physiologie musculaire, cardio-pulmonaire et digestive (Partie I), puis nous aborderons les bases de la nutrition humaine (Partie II).

En effet, ces bases sont importantes pour pouvoir dresser les besoins nutritionnels des sportifs d'endurance et les guider dans un choix efficace de compléments alimentaires, tout en évitant la dérive vers des conduites dopantes (Partie III).

PARTIE I : LE SPORTIF

I. Généralités sur le sport

L'exercice physique est de moins en moins associé aux activités professionnelles et aux déplacements de la vie quotidienne. La dépense énergétique des individus est limitée par le travail sédentaire et par les activités récréatives passives (télévision, internet, jeux vidéo).

A. Une société de plus en plus sédentaire

Les enquêtes françaises montrent que 84 % de la population ont pratiqué une activité physique ou sportive entre 15 et 75 ans au cours de l'année écoulée. Si 45 % des Français ont exercé dans la semaine passée une activité minimale entraînant des bénéfices pour la santé (plus de 10 minutes par jour), 42 % se situent en dessous de 10 minutes, et 19 % dépassent les deux heures par semaine. Les activités les plus populaires sont la marche, la natation, le vélo, les jeux de boule, les activités gymniques et les sports d'hiver. Pour les sports organisés, le football et le tennis sont largement en tête.

Les enfants, les adolescents et les jeunes adultes pratiquent plus que leurs aînés et les garçons plus que les filles. Toutefois, en France, 11 % des filles et 25 % des garçons seulement ont une activité physique conforme aux recommandations.

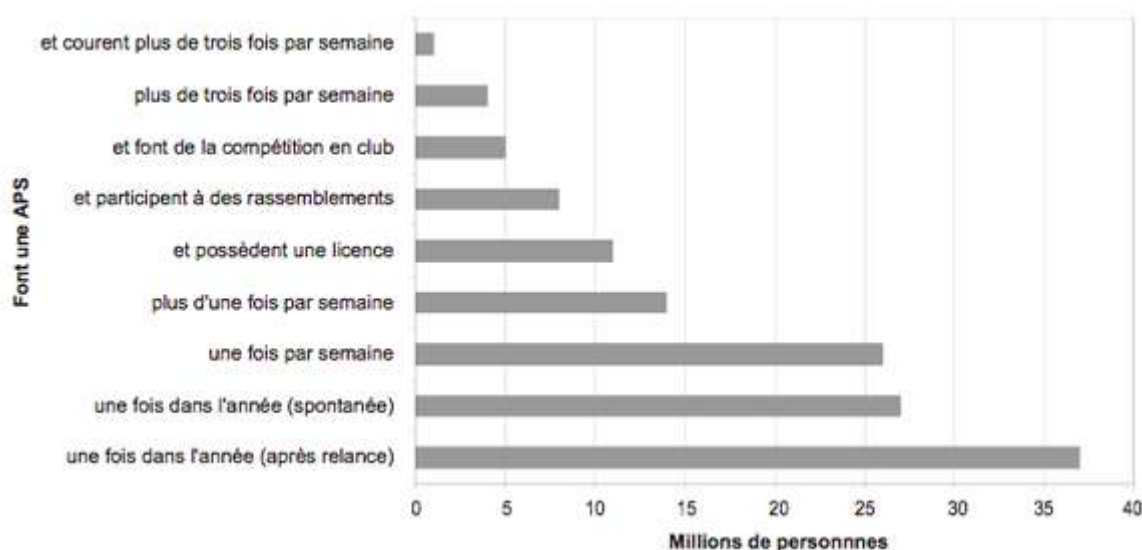


Figure 1 - Niveaux de pratique d'activité physique et sportive (APS) en France. [1]

B. Effets bénéfiques du sport

Les effets bénéfiques des activités physiques et sportives sur la santé sont connus depuis l'Antiquité, et confirmés par toutes les études épidémiologiques modernes : elles montrent que le risque de décès prématuré est moindre chez les personnes physiquement actives que chez les autres, résultat valable quels que soient l'âge et la cause de décès, de manière plus probante chez les hommes que chez les femmes.

La pratique d'une activité physique modérée (au moins 3 heures par semaine) ou d'une activité intense (au moins 20 minutes trois fois par semaine) diminue ainsi de 30 % le risque de mortalité prématurée. La pratique régulière d'un sport améliore le bien-être émotionnel, le bien-être physique, la qualité de vie et la perception de soi.

L'activité physique est primordiale en prévention primaire des maladies cardiovasculaires mais également en prévention secondaire. Elle intervient également dans le traitement de la dyspnée au cours de la broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO). Elle joue un rôle fondamental pour éviter le gain de poids et elle réduit le risque de certains cancers (colorectal, sein, endomètre, poumon, prostate...).

C. Risques du sport

Les bénéfices d'une activité sportive ne doivent pas faire oublier les risques ! Chaque médaille a son revers, et le sport n'y échappe pas. On sait par exemple que la pratique régulière d'une activité physique peut augmenter le risque de lésions aiguës (fracture, luxation, traumatisme crânien, rupture des ligaments croisés, entorse...) ou chroniques (tendinite de l'épaule pour la natation, tendinopathies du genou et de la cheville pour le vélo ou la course à pied...). Chez l'enfant, il y a un risque de surmenage des cartilages de croissance. De même, il semble que 4 % des personnes pratiquant une activité physique de manière intense présentent un profil d'addiction. Ainsi, la promotion de l'activité physique doit toujours être personnalisée, c'est-à-dire adaptée à l'âge, le sexe, la santé et la condition physique des individus. [1]

D. L'endurance

L'endurance est la possibilité de maintenir dans le temps un certain niveau d'intensité lors d'un effort prolongé.

Les allures d'endurance se font en « aérobie », c'est-à-dire que l'énergie utilisée par les muscles au cours de l'effort est essentiellement fournie par l'oxydation des sucres et des lipides disponibles. Dans ce cas, on respire vite mais on n'est pas essoufflé : l'effort peut durer longtemps car le métabolisme est rentable sur le plan énergétique. Quand l'essoufflement

apparaît, l'oxygène n'arrive plus en quantité suffisante au niveau des muscles : l'énergie provient alors d'un autre métabolisme dit « anaérobie », beaucoup plus éprouvant. L'effort ne pourra pas durer longtemps. Pour définir plus précisément l'endurance, et même la chiffrer, on peut donc se servir de la VO_2 max, qui est le débit maximum possible d'oxygène consommé lors d'un effort (mesuré pour une personne donnée). C'est un peu comme pour une automobile. La consommation d'essence est variable en fonction de l'effort fourni par le moteur, mais la cylindrée de la voiture est une valeur fixe qui met un seuil à l'effort maximum qui pourra être fourni par le moteur. L'endurance se situe en dessous de ce seuil et se définit comme la capacité à maintenir dans le temps une partie de cet effort maximum « aérobie ». Par ailleurs, ce seuil aérobie peut être amélioré par l'entraînement.

E. Quels sont les sports d'endurance ?

On pourrait dire que pratiquement tous les sports où une variation rapide et intense de l'effort fourni n'est pas nécessaire sont des sports d'endurance. Ainsi, le jogging est un sport d'endurance, mais aussi le vélo, lorsque l'effort est régulier, et en dehors de tout esprit de compétition, tout comme l'aviron, le ski de fond ou la natation. D'une manière générale, les sports où le score et l'affrontement compétitif sont fondamentaux sont peu propices à une pratique en endurance (tennis, squash, arts martiaux, rugby...). [2]

II. Système musculaire

A. Généralités

Les muscles forment l'ensemble de tissus le plus important de l'organisme et représentent environ la moitié du poids du corps. Les muscles squelettiques à eux seuls, valent environ 40% du poids du corps chez l'homme et 32% chez la femme, alors que les muscles lisses et le muscle cardiaque valent environ 10% du poids total.

C'est en déplaçant des composants intracellulaires spécifiques que les muscles produisent de la force et se raccourcissent, c'est-à-dire se contractent. On distingue trois types de muscles : les muscles squelettiques, les muscles lisses et le muscle cardiaque. Grâce à leur capacité de se contracter, des groupements de cellules musculaires peuvent produire mouvement et travail. La contraction contrôlée des muscles rend possible les mouvements du corps ou de parties de celui-ci (comme la marche ou un signe de la main), la manipulation d'objets (comme le déplacement d'un meuble ou la conduite automobile), la progression du contenu d'organes creux (comme la circulation du sang ou les mouvements des aliments dans

le tube digestif) et l'évacuation de certains organes vers l'environnement (comme l'émission d'urine ou l'accouchement).

La structure et les fonctions de ces trois types de muscles sont différentes ; mais on peut les classer de deux façons en fonction de caractéristiques communes :

- Premièrement, on distingue les muscles *striés* (muscles squelettiques et cardiaque) et les muscles *non striés* (lisses) selon qu'il y a ou non une alternance régulière de bandes sombres et claires quand on examine le muscle au microscope optique.
- Deuxièmement, on distingue les muscles *volontaires* (muscles squelettiques) et *involontaires* (muscles lisses et cardiaque) selon qu'ils sont innervés par le système nerveux somatique et soumis au contrôle volontaire ou par le système nerveux autonome et indépendants du contrôle volontaire.

Bien que les muscles squelettiques soient qualifiés de volontaire, nombreuses sont ses activités qui sont inconscientes et indépendantes du contrôle volontaire comme celles liées à la posture ou à des actions stéréotypées comme la marche. [3]

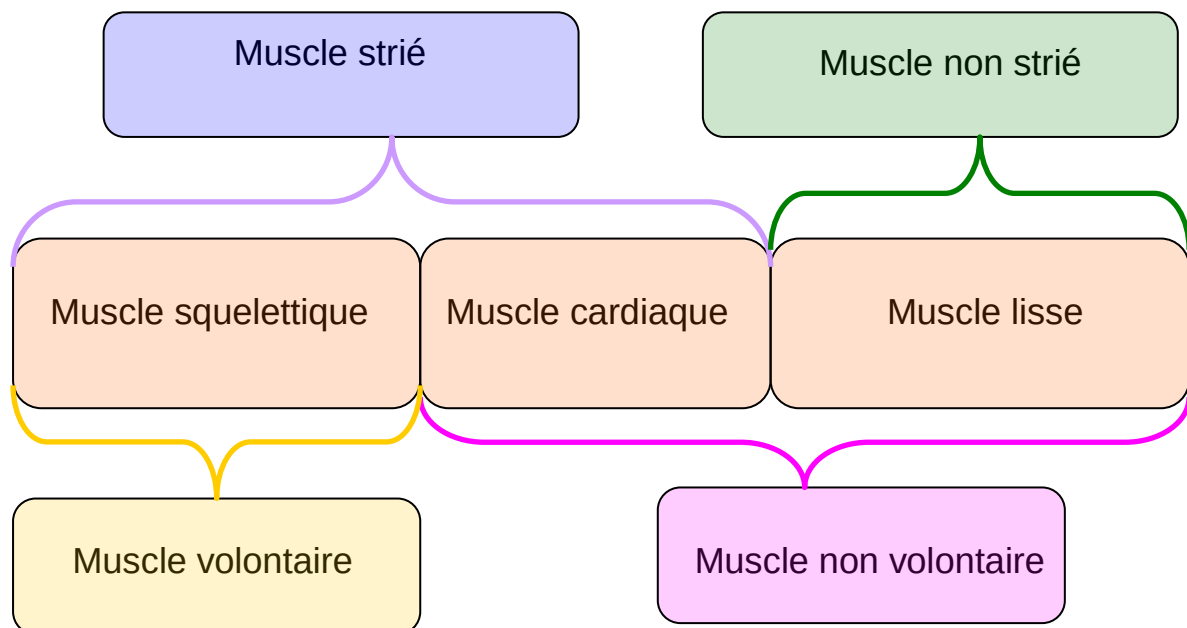


Figure 2 – Classification des muscles en fonction des caractéristiques communes. [3]

B. Architecture du muscle squelettique

La fonction musculaire dépend principalement de l'innervation et de l'activation musculaire par le système nerveux central. La fibre musculaire squelettique est une cellule cylindrique plus ou moins allongée. Son épaisseur varie d'un muscle à l'autre, et même au

niveau du même muscle, et peut se situer entre 10 et 100 μm . Les cellules musculaires sont souvent aussi longues que le muscle lui-même et s'étendent du tendon de l'une des extrémités à celui de l'autre extrémité.

La cellule musculaire comporte plusieurs noyaux ; le nombre de ceux-ci peut atteindre plusieurs centaines par cellule.

Les autres éléments de cette cellule sont le sarcolemme, les myofibrilles et le sarcoplasme.

1. Le sarcolemme

Le sarcolemme est une fine membrane élastique dépourvue de cellules, dont l'épaisseur n'atteint pas 10 nm, qui limite à l'extérieur la fibre musculaire striée. Il présente aussi des caractéristiques électriques particulières.

La partie contractile de la cellule est constituée par les myofibrilles. Chaque fibre (ou cellule) musculaire contient un grand nombre de myofibrilles, chacune épaisse de 1 à 3 μm , orientées parallèlement les unes aux autres. Les myofibrilles sont disposées de façon telle dans le sarcolemme, que les points de chacune d'elles présentant la même densité optique, se trouvent au même niveau, ce qui donne l'impression de disques s'étalant sur toute la largeur de la fibre.

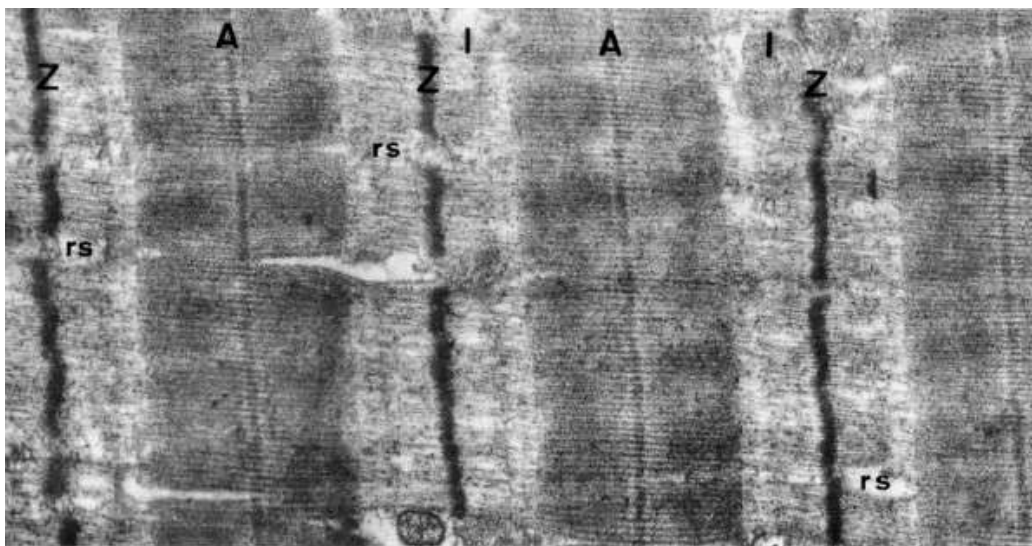


Figure 3 - Vue en microscopie électronique d'un muscle strié. [5]

Légende :

- Z : Strie Z

- A : Bande A

- I : Bande I

- rs : Réticulum sarcoplasmique

Dans le sens longitudinal chaque unité appelée sarcomère, est limitée par une mince membrane appelée strie Z, telle un disque, partage l'ensemble des myofibrilles en unité.

A mi-longueur de chaque sarcomère se trouve une bande opaque, la bande A par référence aux propriétés optiques du tissu (A est utilisée pour *anisotrope* c'est à dire un corps dont les propriétés optiques, physiques ou mécaniques varient selon les directions [6]).

Les bandes claires intercalées entre elles sont *isotropes* (Terme qualifiant les corps, les milieux, dont les propriétés sont semblables quelles que soient les directions [7]). d'où leur nom de bande I.

La région située au centre de la bande A est appelée la zone H ; celle-ci est moins réfringente (et donc plus claire) que le reste de la bande A (l'appellation H provient du nom de Hensen qui l'a le premier décrite en 1868).

Dans la partie centrale de la zone H se trouve une structure plus sombre appelée ligne M (de l'allemand *mittelinie* qui signifie ligne médiane).

2. Les myofibrilles

a) Description générale

Deux faisceaux de molécules protéiques, ou filaments, sont disposés avec une orientation parallèle dans la myofibrille. Les filaments de *myosine* (longs de 1,6 μm et épais de 15 nm), disposés dans le sens de leur longueur, constituent la bande A.

Les autres filaments sont constitués d'une protéine, l'*actine*. Ils sont plus fins (6 nm de diamètre), ont leur origine située au niveau de la strie Z et s'étendent le long de la bande A jusqu'à la limite de la zone H. De part et d'autre de la strie Z ces filaments d'actine s'étendent sur 1,0 μm . [4]

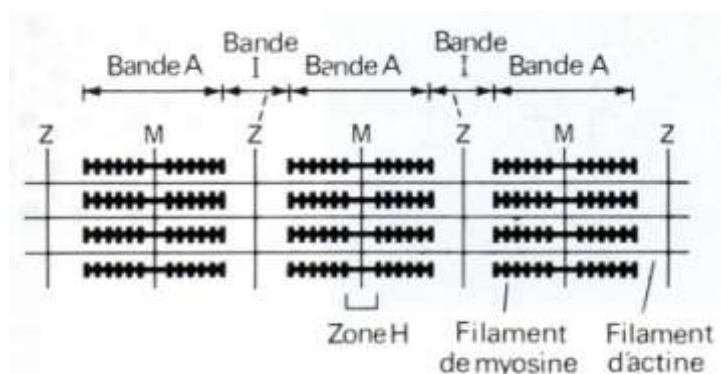


Figure 4 - Représentation schématique des filaments protéiques de la myofibrille. [4]

Les filaments épais sont constitués de myosine, les filaments fins sont constitués d'actine.

b) Actine-myosine

Une molécule d'*actine* est une protéine globulaire composée d'un seul polypeptide qui se polymérise avec d'autres molécules d'actine pour former des chaînes hélicoïdales

entrelacées (figure 5). Ces chaînes constituent le cœur d'un filament fin. Chaque molécule d'actine porte un site de fixation pour la myosine.

La molécule de *myosine*, quant à elle, est constituée de deux grosses chaînes lourdes polypeptidiques et de quatre chaînes légères, plus petites. Ces polypeptides se combinent pour former une molécule qui consiste en deux têtes globulaires (contenant les chaînes lourdes et légères) et une longue queue formée de deux chaînes lourdes entrelacées (figure 5). La queue de chaque molécule de myosine s'étend le long de l'axe du filament épais et les deux têtes globulaires en sortent de chaque côté, formant les ponts transversaux. Chaque tête globulaire contient deux sites de fixation, l'un pour l'actine et l'autre pour l'ATP. Le site de fixation de l'ATP est en outre une enzyme, une ATPase qui hydrolyse l'ATP fixé et procure ainsi de l'énergie pour la contraction.

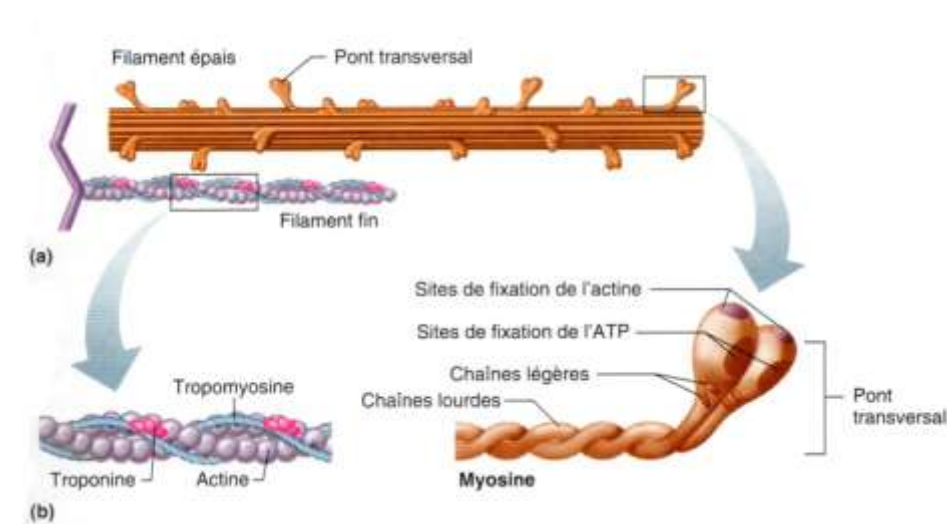


Figure 5 - (a) Les chaînes lourdes des molécules de myosine forment le centre du filament épais. Les molécules de myosine sont orientées dans des directions opposées dans chaque moitié d'un filament épais. (b) Structure du filament fin et de la molécule de myosine. [8]

L'espace entre les filaments fins et épais qui s'entremêlent est occupé par des projections appelées ponts transversaux. Ce sont des parties de molécules de myosine qui s'étendent de la surface des filaments épais vers les filaments fins (figure 6). Pendant la contraction musculaire, les ponts transversaux entrent au contact des filaments fins et y exercent une force.

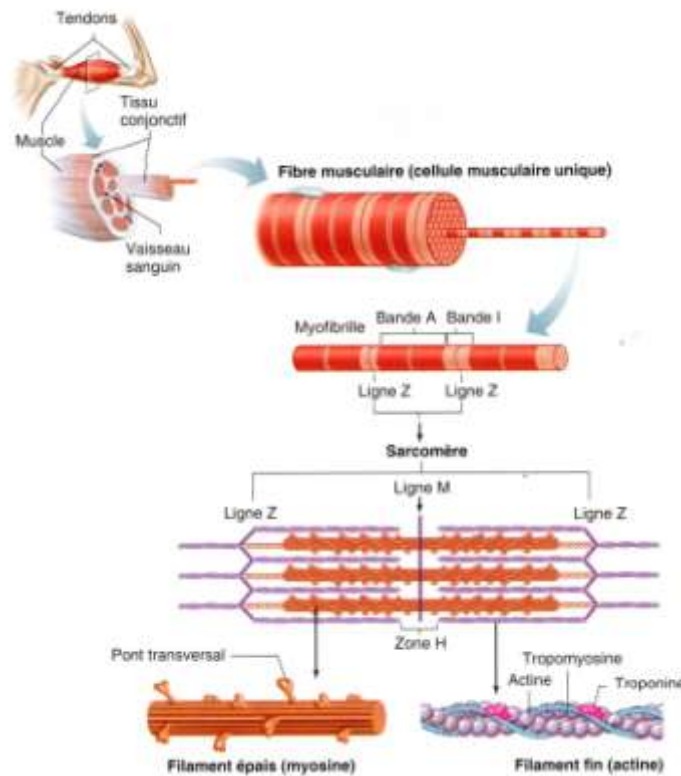


Figure 6 - Structure du muscle squelettique. [8]

3. Le sarcoplasme

Les filaments décrits précédemment baignent dans un liquide qui contient des protéines solubles (telles que la myoglobine), des gouttelettes de glycogène et de graisse, des composés phosphorés et diverses autres petites molécules et particules ioniques. Cette phase aqueuse porte le nom de *matrice sarcoplasmique*.

Une partie du sarcoplasme porte le nom de *réticulum sarcoplasmique*. Celui-ci consiste en un ensemble de sacs tubulaires aux anastomoses multiples, de vésicules et de canaux de calibre variable, disposés dans les espaces qui séparent les myofibrilles, tout ceci pouvant évoquer un parement ou un manchon de dentelle (figure 7). Les membranes qui limitent canaux et vésicules ont une structure comparable à celle du sarcolemme. On trouve au voisinage des lignes Z, des cavités ou citernes orientées transversalement (*citernes terminales*), disposées perpendiculairement à la direction des myofibrilles, et se trouvant en étroit contact avec un système tubulaire, *le système tubulaire transverse (système T)*. Ces deux systèmes membranaires, le réticulum sarcoplasmique et le système T, sont cependant séparés l'un de l'autre mais associés dans une structure appelée triade (figure 7).

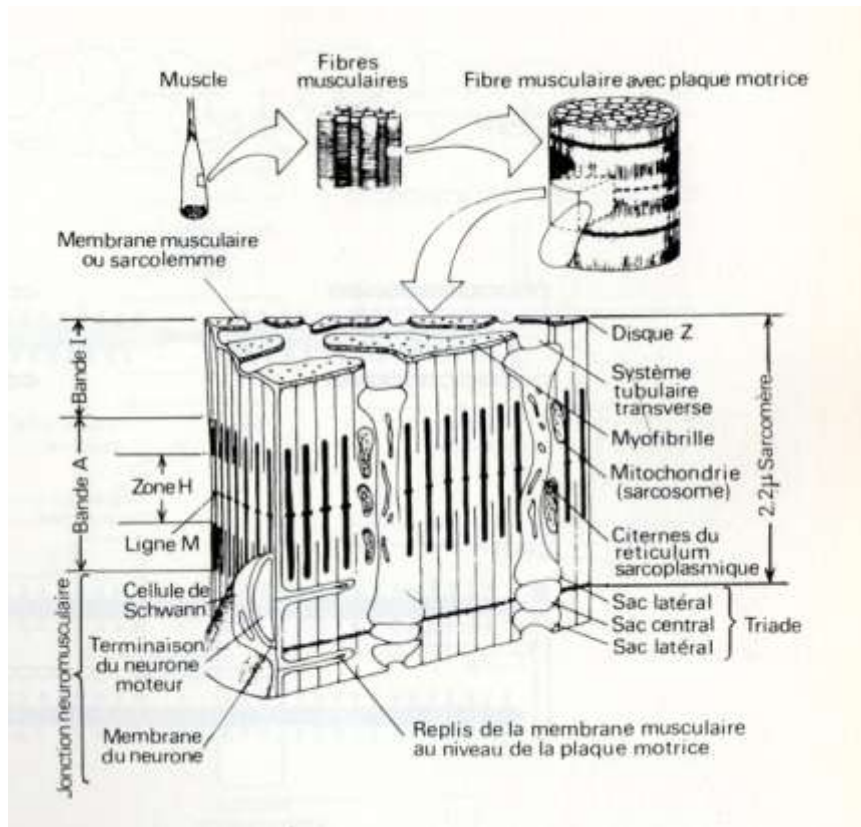


Figure 7 - Grossissement d'une fibre musculaire striée, montrant le système myofibrillaire, le système tubulaire transverse, le réticulum sarcoplasmique et la plaque motrice. [9]

L'onde de stimulation musculaire, progressant le long du sarcolemme de la fibre, peut pénétrer dans celle-ci grâce à ce système tubulaire. Le système T est un ensemble d'extension en doigt de gant du sarcolemme. Dans les muscles de mammifères, l'ouverture des tubules T se situe à l'interface A-I de telle façon qu'il en existe une de chaque côté de la bande A pour un seul sarcomère. Les tubules T sont des invaginations qui ne s'ouvrent pas dans le cytoplasme.

Les ions Ca^{2+} , qui jouent un rôle clé dans l'interaction actine-myosine, sont libérés à partir du réticulum sarcoplasmique. [9]

C. Contraction musculaire

La contraction de la fibre musculaire striée squelettique fait intervenir le raccourcissement des sarcomères, les filaments fins et épais qui se chevauchent glissent les uns contre les autres vers le milieu du disque A et peuvent faire disparaître la bande H. Dans leur mouvement, ils entraînent les stries Z, et c'est la sommation des contractions élémentaires des sarcomères qui provoque le rapprochement des deux parties extrêmes de la fibre. [10]

1. Mécanisme de glissement des filaments

Pendant le raccourcissement des sarcomères, il n'y a aucune modification de longueur ni des filaments épais ni des filaments fins (figure 8).

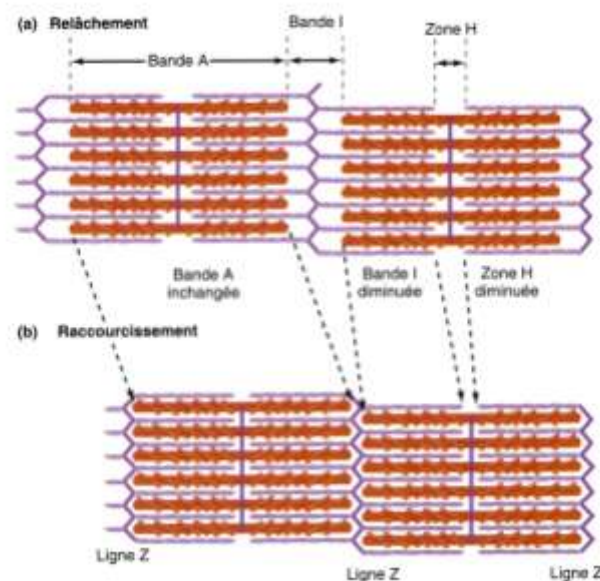


Figure 8 - Le glissement des filaments épais qui chevauchent les filaments fins raccourcit le sarcomère sans changement de la longueur des filaments fins et épais. La bande I et la zone H se réduisent. [11]

La séquence d'événements qui se déroulent entre la fixation d'un pont transversal sur un filament fin, son déplacement, puis son repositionnement pour recommencer le processus, est appelée cycle des ponts transversaux.

Chaque cycle comporte quatre étapes :

- 1) fixation du pont transversal sur un filament fin ;
- 2) déplacement du pont transversal, ce qui engendre une tension dans le filament fin ;
- 3) détachement du pont transversal du filament fin ;
- 4) activation énergétique du pont transversal qui peut se fixer de nouveau sur un filament fin et répéter le cycle.

Chaque pont transversal suit son propre cycle de mouvement, indépendamment des autres ponts.

Les événements chimiques et physiques survenant au cours des quatre étapes du cycle des ponts transversaux sont illustrés dans la figure 9.

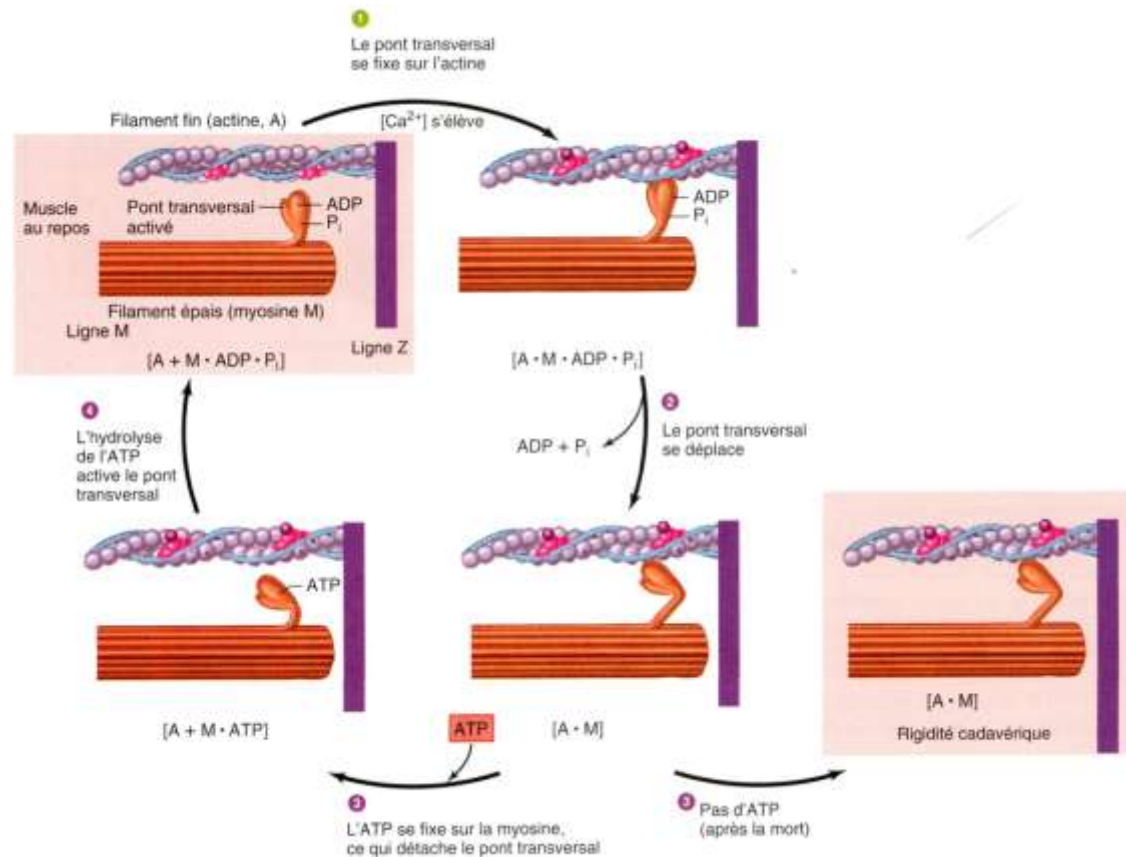


Figure 9 - Représentations chimiques (entre crochets) et mécanique des quatre étapes d'un cycle de pont transversal. Dans une fibre musculaire au repos, la contraction commence quand le calcium active le filament fin. [11]

Dans une fibre musculaire au repos, la concentration cytoplasmique de calcium est basse et les ponts transversaux de la myosine (M) ne peuvent pas se fixer sur l'actine (A). Les ponts transversaux sont toutefois en état d'activation énergétique, suite à la dégradation de l'ATP, et les dérivés de l'hydrolyse (ADP et phosphate inorganique) sont encore liés à la myosine. Ce stockage d'énergie dans la myosine est analogue au stockage d'énergie potentielle dans un ressort étiré.

Le cycle des ponts transversaux est initié par l'entrée de calcium dans le cytoplasme (par un mécanisme que nous décrirons brièvement).

Le cycle débute par la fixation d'un pont transversal de myosine activé sur une molécule d'actine d'un filament fin (étape 1) :

Etape 1 - Fixation d'actine : **$A + M-ADP-Pi \rightarrow A-M-ADP-Pi$**

La fixation de la myosine active sur l'actine déclenche la libération de la conformation sous tension du pont activé, ce qui engendre le déplacement du pont transversal fixé (phénomène parfois appelé rotation des ponts) et la libération de Pi et d'ADP (étape 2) :

Etape 2 - Déplacement du pont transversal : **$A-M-ADP-Pi \rightarrow A-M + ADP + Pi$**

Cette séquence de stockage et de libération d'énergie par la myosine est analogue à ce qui se passe dans un piège à souris : l'énergie est stockée dans le piège en armant le ressort (hydrolyse de l'ATP), puis libérée quand il saute (fixation à l'actine).

Au cours du déplacement du pont transversal, la myosine est très étroitement fixée à l'actine, et cette liaison doit être rompue pour que le pont transversal puisse se réactiver et reprendre le cycle. La fixation d'une nouvelle molécule d'ATP sur la myosine rompt le lien entre l'actine et la myosine (étape 3) :

Etape 3 - Dissociation du pont transversal de l'actine : **$A-M + ATP \rightarrow A + M-ATP$**

La dissociation de l'actine et de la myosine par l'ATP est un exemple de régulation allostérique de l'activité protéique. La fixation de l'ATP sur un site de la myosine diminue l'affinité de cette dernière pour l'actine fixée sur un autre site. Noter que l'ATP n'est pas dégradée au cours de cette étape, c'est-à-dire qu'elle n'est pas utilisée comme source d'énergie mais uniquement comme modulateur allostérique de la tête de myosine, en affaiblissant la fixation de la myosine sur l'actine.

Après dissociation de l'actine et de la myosine, l'ATP fixée à la myosine est dégradée (étape 4), reconstituant ainsi l'état activé de la myosine

Etape 4 - Hydrolyse de l'ATP : **$A + M-ATP \rightarrow A + M-ADP-Pi$**

Noter que l'hydrolyse de l'ATP (étape 4) et le déplacement du pont transversal (étape 2) ne sont pas des événements simultanés. S'il existe encore du calcium à ce stade, le pont transversal peut de nouveau s'attacher à une nouvelle molécule d'actine du filament fin, et le cycle des ponts transversaux se répète. [11]

2. Couplage excitation-contraction et rôles de la troponine et de la tropomyosine

Le processus par lequel la dépolarisation d'une fibre musculaire déclenche sa contraction porte le nom de couplage excitation-contraction. Le potentiel d'action se transmet à toutes les fibrilles de la cellule via le système T. Il déclenche une libération de Ca^{2+} des citernes terminales, qui sont les sacs latéraux du réticulum sarcoplasmique près du système T.

Le Ca^{2+} déclenche alors la contraction en se liant à la troponine C. Au repos, la troponine I est fermement liée à l'actine dans le muscle et la tropomyosine recouvre les sites par lesquels les têtes de myosine se lient à l'actine. Ainsi le complexe troponine-tropomyosine joue le rôle d'une protéine de relaxation, puisqu'il inhibe l'interaction entre l'actine et la myosine.

Quand le Ca^{2+} libéré par le potentiel d'action se lie à la troponine C, la liaison entre la troponine I et l'actine se trouve vraisemblablement affaiblie, ce qui permet à la tropomyosine de se déplacer latéralement. Ce mouvement découvre les sites auxquels peuvent se lier les têtes de myosine. L'ATP est alors hydrolysée et la contraction se produit. La liaison d'un ion calcium à une molécule de troponine découvre sept sites de liaisons pour la myosine.

Peu après sa libération, le Ca^{2+} recommence à être transporté activement dans les portions longitudinales du réticulum sarcoplasmique. Le Ca^{2+} diffuse ensuite dans les citernes terminales pour y être stocké jusqu'à ce qu'un nouvel potentiel d'action le libère.

L'interaction chimique entre l'actine et la myosine cesse et le muscle se relâche dès que la concentration du Ca^{2+} à l'extérieur du réticulum sarcoplasmique a suffisamment baissé. Il est à noter que l'ATP fournit l'énergie pour la contraction comme pour la relaxation. En cas d'inhibition du transport Ca^{2+} dans le réticulum, la relaxation ne se produit pas, même s'il n'y a plus de potentiel d'action, la contraction soutenue qui en résulte est appelée contracture.

La dépolarisation de la membrane des tubules T active le réticulum sarcoplasmique via les récepteurs dihydropyridine qui les bloque (figure 10). Ce sont des canaux calciques sensibles au voltage de cette membrane.

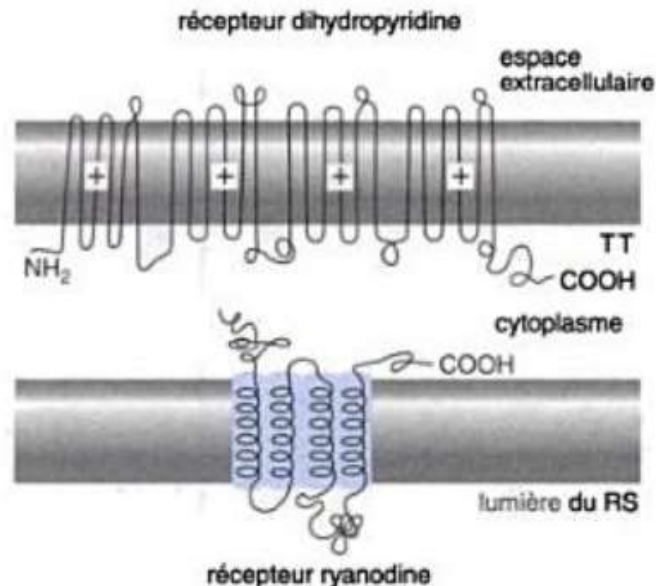


Figure 10 -La relation entre le tubule T (TT) et le réticulum sarcoplasmique (RS) pour le transport du Ca^{2+} . [12]

Dans le muscle squelettique, le récepteur dihydropyridine sensible au voltage du tubule T déclenche la libération de Ca^{2+} à partir du réticulum sarcoplasmique via le récepteur ryanodine.

Dans le muscle cardiaque, la libération de Ca^{2+} du réticulum sarcoplasmique est déclenchée par un influx de Ca^{2+} par ces canaux, mais dans le muscle squelettique, la libération du Ca^{2+} se produit sans un tel influx de Ca^{2+} . C'est plutôt le récepteur de dihydropyridine qui agit comme senseur de voltage et qui déclenche la libération du Ca^{2+} du réticulum sarcoplasmique voisin.

Le canal calcique du réticulum qui s'ouvre pour laisser sortir le Ca^{2+} n'est pas commandé par le voltage et on l'appelle le récepteur ryanodine parce qu'il est bloqué en position ouverte par l'alcaloïde végétal ryanodine. La pompe qui ramène le Ca^{2+} dans le réticulum et produit la relaxation est l'ATPase $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$. [12]

D. Types de fibres musculaires

1. Typologie musculaire

Les données histochimiques nous permettent de déterminer les grandes catégories de fibres musculaires chez l'homme. La classification est basée sur les caractéristiques contractiles et métaboliques. Par mesure de simplification, nous n'utiliserons que la terminologie la plus usitée, fibres I, IIa, IIb, IIc, tout en sachant que des fibres IIx sont actuellement identifiées chez l'homme.

Les fibres IIx sont intermédiaires entre les IIa et les IIb en ce qui concerne leur activité enzymatique oxydative, leur vitesse de contraction et leur résistance à la fatigue. Pour éviter

la confusion, nous conserverons la dénomination IIb car les caractéristiques des fibres II sont essentiellement observées dans les fibres IIb chez l'homme. Les fibres IIc sont dénommées « immatures » ou « indifférenciées » car elles peuvent se transformer en fibres IIb, IIa ou I.

Rappelons aussi que chez l'homme, la composition des muscles est hétérogène (composé de différents types de fibres) et que chez des animaux comme le rat, le cochon d'inde ou le chat, certains muscles sont presque exclusivement constitués de fibres lentes (soléaire) ou de fibres rapides (vaste externe). L'homme est donc un « animal » particulier.

Les *fibres de type I* (lentes) possèdent un potentiel oxydatif élevé et donc un potentiel glycolytique relativement plus faible. Ce fonctionnement de type « aérobie » s'explique par certaines spécificités. Les capillaires sanguins sont très denses au sein de ces fibres. Les mitochondries y sont nombreuses et leur activité est très développée. Le glycogène et les acides gras sont les substrats préférentiellement utilisés. Ces fibres sont peu fatigables mais leur rendement énergétique est limité.

Les *fibres du type II* (rapides) sont subdivisées en sous-groupes, les fibres IIa et IIb. Les fibres *IIa* sont relativement bien capillarisées et possèdent un nombre important de mitochondries. La capacité oxydative de ces fibres est cependant moins élevée qu'au sein des fibres I. Ce sont des fibres intermédiaires.

Les *fibres IIb* sont peu capillarisées et les mitochondries y sont très limitées. Le potentiel glycolytique de ces fibres est très élevé. Le glycogène est le substrat presque exclusivement utilisé. Le rendement énergétique des fibres de type II est très élevé mais leur seuil de fatigabilité est bas.

Les *fibres « indifférenciées » ou « immatures » (fibres IIc)* cumulent les caractéristiques métaboliques des fibres I et des fibres IIb. Cependant, leur faible pourcentage n'a pas encore permis une caractérisation précise de leurs activités enzymatiques. [13]

2. Effets de l'entraînement

Le pourcentage de répartition des fibres dans les muscles semble génétiquement déterminé. Les sédentaires ont généralement 45 à 55% de fibres lentes. La variabilité individuelle est très grande, c'est-à-dire que la composition fibrillaire d'un muscle, d'un individu à l'autre, est très changeante (et même d'un muscle à un autre muscle chez le même individu). Certains sont favorisés par la nature. Chez des sprinteurs de niveau mondial, la

proportion de fibres rapides dans les muscles des membres inférieurs peut aller jusqu'à 80%. Chez les athlètes d'endurance c'est l'inverse.

Certaines études semblent démontrer que la possibilité de modification et de conversion d'un type de fibre à un autre est possible (schéma de Howald) :

- C'est-à-dire la transformation des fibres rapides en fibres lentes grâce à un entraînement d'endurance approprié,
- L'inverse semble plus problématique.

En tout état de cause, il est probable que (pour un haut niveau de performance) par un entraînement spécifique, il puisse y avoir une conversion des fibres IIb vers les fibres IIa (par augmentation des mitochondries et du stock d'enzymes aérobies). [14]



Figure 11 - Schéma de Howald (conversion des fibres musculaires). [14]

E. Voies énergétiques

Comme nous l'avons vu précédemment, le pouvoir contractile du muscle squelettique dépend essentiellement de l'interaction des protéines spécifiques, l'actine et la myosine. Ce mécanisme ne peut fonctionner que par l'utilisation des réserves riches en énergie stockées sous forme d'ATP et de phosphocréatine. Malheureusement, ces réserves sont disponibles en très faible quantité permettant uniquement quelques dizaines de secondes de travail musculaire.

Pour assurer des exercices physiques prolongés, il faut donc perpétuellement maintenir le renouvellement de l'ATP musculaire. Les stocks énergétiques issus de l'oxydation des aliments représentent le carburant essentiel régénérant l'ATP. La sollicitation des différentes sources d'énergie dépend des conditions de l'effort, de son intensité, de sa durée et de l'état initial du stock des différents substrats. De façon schématisée, deux systèmes fonctionnent sans apport d'oxygène, le système ATP-CP (*CP = Créatine Phosphate*) et la glycolyse anaérobie alors que la lipolyse et la glycolyse aérobie utilisent l'oxygène. [15]

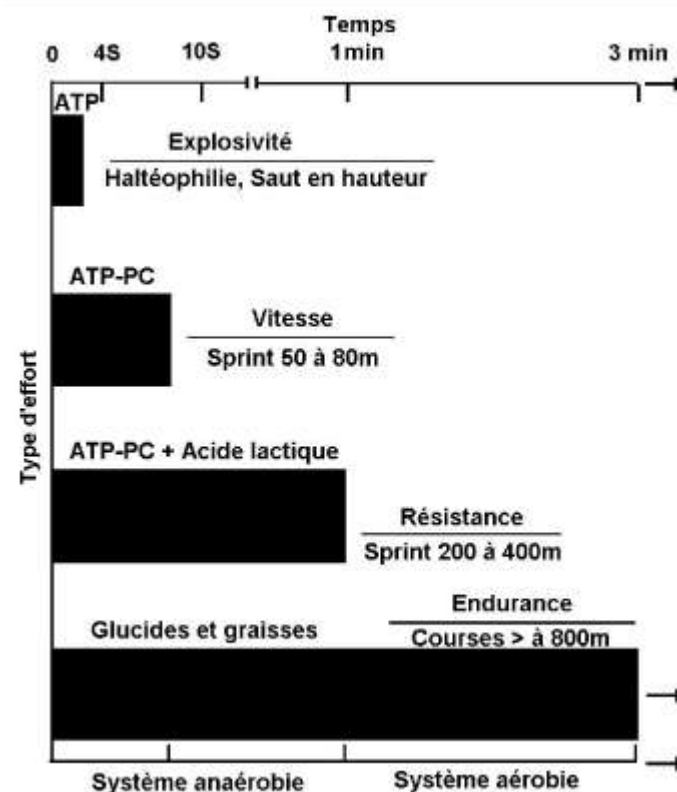


Figure 12 - Contribution des différents processus énergétiques en fonction du type d'effort. [16]

Les voies métaboliques mises en jeu lors de l'exercice musculaire diffèrent selon la durée et l'intensité de l'effort. [15]

Chaque processus est caractérisé par :

- un délai d'intervention ;
- une capacité (ou réserve totale d'énergie, exprimée en calories ou en Joules) ;
- une puissance (ou quantité maximale d'énergie libérée par unité de temps, exprimée en Watts) ;
- un rendement (ou pourcentage de l'énergie utilisée par rapport à l'énergie libérée).

Pour illustrer ceci par une image simpliste, mais somme toute assez proche de la réalité, on pourrait dire que la capacité d'un sportif, pour un processus donné, correspond à l'autonomie d'une voiture, tandis que sa puissance pourrait être assimilée à sa vitesse de pointe et son rendement à sa consommation moyenne.

1. Le processus anaérobie alactique

Ce processus correspond au mécanisme de synthèse de l'ATP et donc d'apport énergétique en l'absence d'oxygène (anaérobie) et sans production d'acide lactique (alactique). Les cellules musculaires disposent de faibles réserves en ATP, mais d'importantes réserves en adénosine diphosphate (ADP) et en phosphocréatine (PC).

Ces molécules sont capables en présence d'enzymes adéquates de "transférer" un phosphate inorganique (Pi) d'une molécule à l'autre.

- En présence d'une créatine-phospho-kinase (CPK) :



- En présence d'une myokinase :



Ce transfert, qui porte le nom de transphosphorylation, est très rapide et met rapidement de nouvelles molécules d'ATP à la disposition de la contraction musculaire.

Ces réactions de transphosphorylation sont facilitées par la diminution de la concentration intracellulaire en ATP et par l'augmentation (généralement concomitante) de la concentration en ADP. D'autre part, ces processus qui se déroulent presque instantanément sont d'une grande puissance (400 W/min chez le sédentaire et 750 W/min chez le sportif confirmé) et ont un rendement élevé ($\pm 41\%$), mais sont d'une capacité très faible et ont une durée d'intervention maximale brève (± 7 sec), limitée par l'épuisement des réserves intracellulaires en ADP et PC.

2. Le processus anaérobie lactique

Dans le cas d'un effort maximal d'une minute environ, l'apport énergétique reste essentiellement anaérobie. En revanche, pour ce type d'effort, il y a une production élevée d'acide lactique au niveau musculaire. C'est la raison pour laquelle ces processus, qui contribuent à resynthétiser des ATP en dégradant du glucose, sans utilisation d'O₂, mais en produisant de l'acide lactique, sont appelés anaérobie lactique.

Dans le muscle, le glucose est stocké sous forme de glycogène. La dégradation de ces molécules est catalysée par des enzymes spécifiques et peut se résumer de la manière suivante :

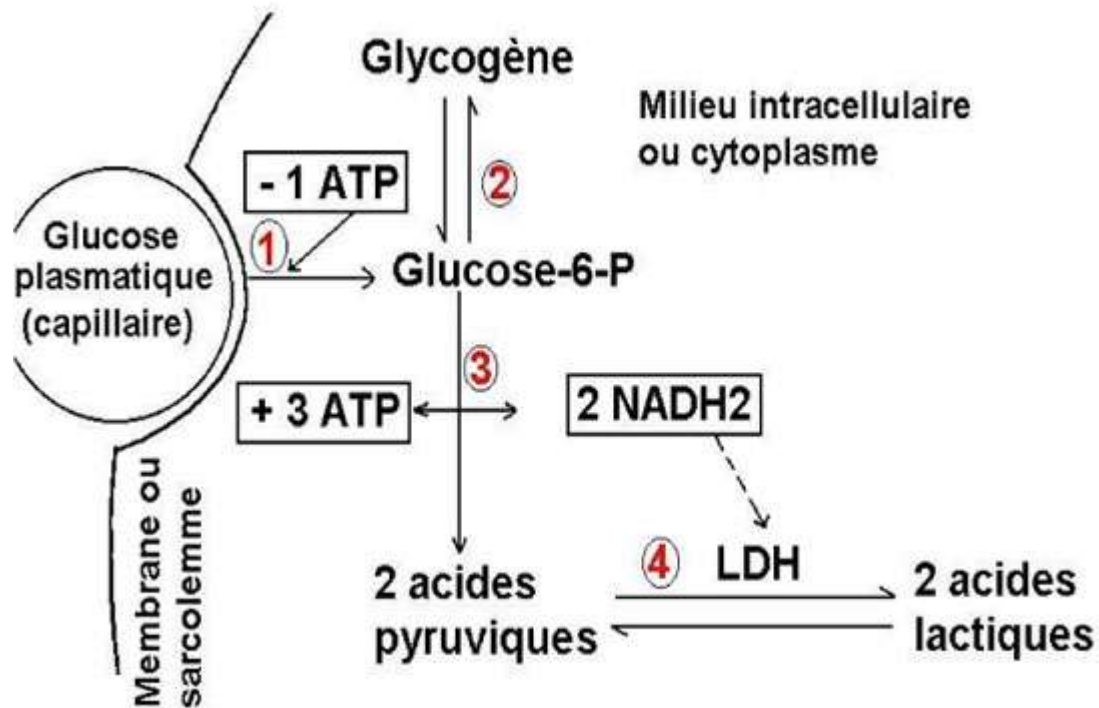


Figure 13 - Représentation schématique des processus anaérobie lactique. [16]

- ① - Le glucose, véhiculé par la circulation sanguine, pénètre dans la cellule musculaire en lui coûtant 1 ATP par molécule.
- ② - Dans le milieu intracellulaire, la molécule de glucose est transformée en glucose-6-phosphate et/ou stockée de manière réversible sous forme de glycogène.
- ③ - La molécule de glucose-6-phosphate est dégradée en 2 molécules d'acide pyruvique ce qui libère de l'énergie permettant de synthétiser 3 ATP.
- ④ - En l'absence d'O₂, les 2 molécules d'acide pyruvique se "transforment" en 2 molécules d'acide lactique en présence d'une lactico-déshydrogénase (LDH).

En anaérobiose, une molécule de glucose dépense 1 ATP pour pénétrer dans la cellule, puis se décompose en 2 acides lactiques, libérant ainsi de l'énergie pour synthétiser 3 ATP. Le bilan final est donc de 2 ATP. Ces processus, qui sont déclenchés dès le début de la contraction, ont un délai d'autant plus court que la baisse initiale d'ATP a été importante mais ne devient en réalité efficace qu'après 20 à 30 secondes. C'est en réalité un système dont la puissance est liée à la capacité d'accumuler des lactates intracellulaires et donc au degré d'entraînement (puissance maximale de 200-250 W/min à 500 W/min chez le sportif entraîné). Cette puissance maximale peut être maintenue de la 30^e à la 50^e seconde. Le rendement de ces processus n'est que de $\pm 26 \%$.

3. Le processus aérobie

Lorsque l'intensité de l'effort diminue et que sa durée augmente au-delà d'une minute, l'approvisionnement énergétique se fait de plus en plus avec apport d'oxygène (aérobie). Ce processus mène à la synthèse des molécules d'ATP, à partir des substrats qui sont essentiellement les glucides et les lipides, accessoirement les protides.

a) La glycolyse aérobie

En présence d'O₂, l'acide pyruvique s'associe au coenzyme A (CoA) pour donner l'acétyl-coenzyme A (acétyl-CoA). Ce dernier est oxydé dans la mitochondrie par un ensemble de réactions appelé cycle de Krebs, qui produit du gaz carbonique (CO₂) et de l'hydrogène (H₂) qui, quant à lui, est fixé sur des "transporteurs" qui l'acheminent vers la chaîne des réactions respiratoires, où seront synthétisés les ATP.

Le bilan final de la glycolyse aérobie, au départ d'une molécule de glucose, est de 38 ATP.

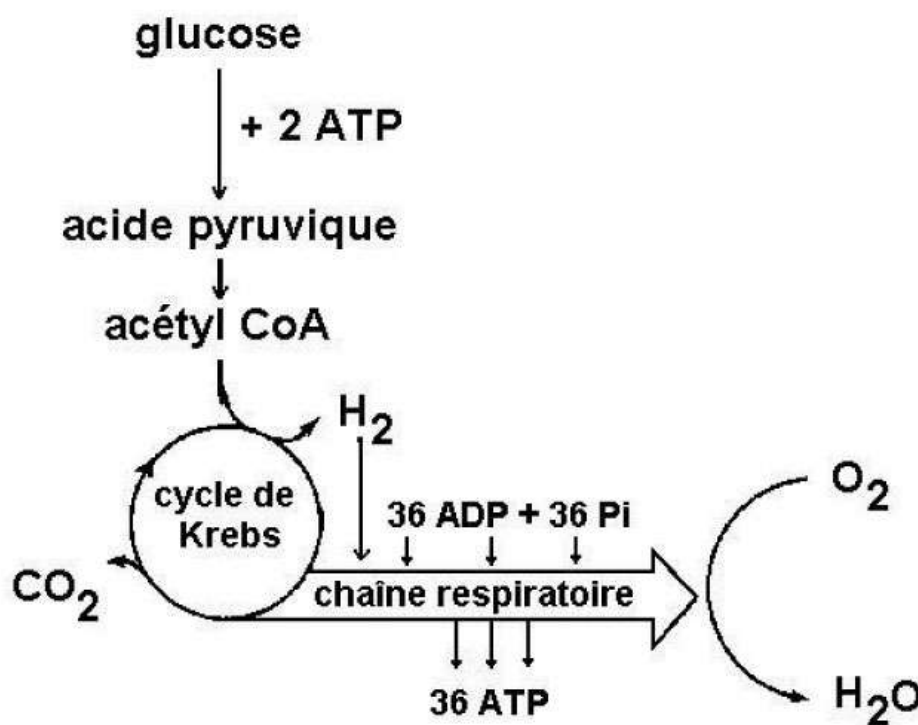


Figure 14 – Représentation schématique de la glycolyse aérobie. [16]

b) La lipolyse

Le muscle utilise principalement les acides gras libres (AGL), provenant de la dégradation des triglycérides. Ces derniers se trouvent initialement dans le plasma, les tissus adipeux et dans les cellules musculaires. La dégradation des triglycérides donne 3 AGL et une

molécule de glycérol qui emprunte la voie de la glycolyse. Les AGL sont quant à eux oxydés (β -oxydation) pour former l'acétyl-CoA qui est oxydé à son tour au niveau du cycle de Krebs. La quantité de molécules d'ATP produite est très élevée. En effet, la dégradation du glycérol produit 22 ATP et celle des 3 AGL en produit 441, ce qui fait un total de 463 ATP par molécule de triglycéride.

Ces processus (glycolyse aérobie et lipolyse), présents au début de l'effort, n'atteignent leur intensité maximale que lorsque le système cardio-respiratoire et circulatoire est complètement adapté à l'exercice (c'est-à-dire 1 à 3 min après le début de l'effort selon l'âge et le niveau d'entraînement). D'autre part, la puissance maximale du processus aérobie, qui est définie par la VO_2 max (consommation maximale d'oxygène) est limitée par les capacités maximales de transport et d'utilisation de la cellule (60 à 120 W/min suivant l'âge, le sexe, le niveau d'entraînement mais également liée aux facteurs héréditaires). La capacité de production d'énergie de ces processus est théoriquement illimitée dans la mesure où les réserves de glucides et de lipides sont quasiment inépuisables. Le rendement moyen de ces processus se situe à 25-26% selon les sujets et les facteurs cités précédemment.

4. Contribution des systèmes anaérobie et aérobie lors d'un exercice physique maximal

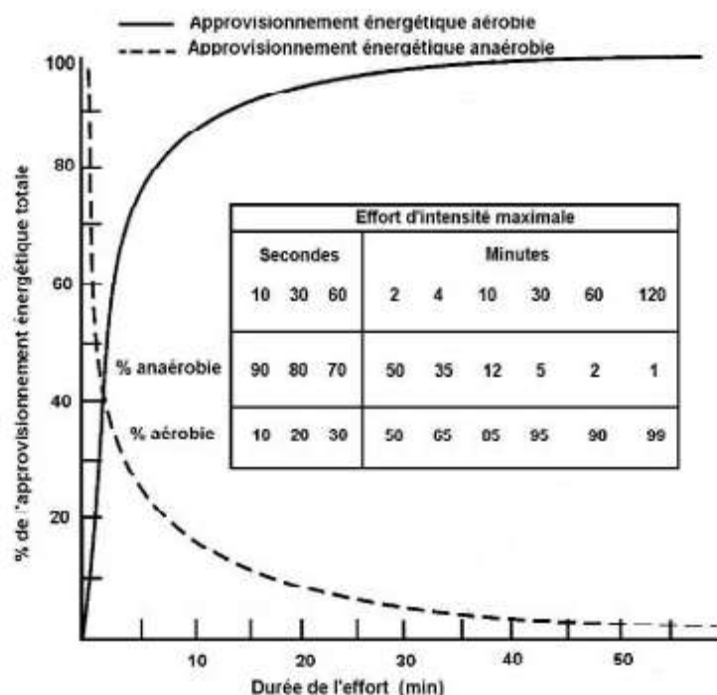


Figure 15 - Apport relatif des systèmes anaérobie et aérobie durant un effort physique maximal de durées différentes. [16]

La figure ci-dessus explique le rapport entre les systèmes aérobie et anaérobie pour un effort maximal en fonction du temps. Il ne faut pas oublier que l'apport relatif des systèmes énergétiques est différent lorsque l'on ne fournit pas un effort maximal.

Si l'on entame son effort par une course à allure calme, le système anaérobie est moins sollicité parce que l'intensité demandée est nettement moindre, ce qui a pour conséquence immédiate d'atteindre rapidement un équilibre entre les besoins en oxygène et sa consommation. A ce moment, c'est le système aérobie qui reprend très rapidement à son compte la majeure partie de l'approvisionnement énergétique.

D'autre part, l'enchaînement des processus de resynthèse de l'ATP en fonction de l'exercice est schématisé dans la figure 16. L'avantage des métabolismes anaérobies est qu'ils ont une haute puissance de resynthèse de l'ATP, permettant la réalisation d'exercices à très haute intensité (vitesse et/ou force élevée) et donc demandant une puissance élevée. De plus, leur délai d'intervention est nul puisqu'ils ne requièrent pas d'oxygène et ne dépendent pas des délais d'ajustement des paramètres cardio-respiratoire et circulatoire. Par contre leur capacité totale est très faible. [16]

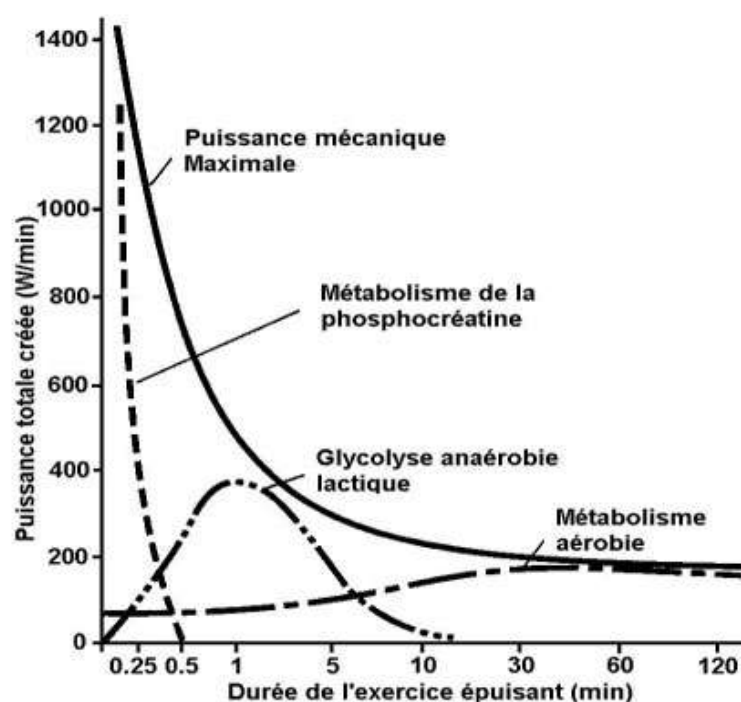


Figure 16 - Diminution de la puissance mécanique maximale créée sur cycle ergomètre en fonction du temps et contribution estimée des apports énergétiques des différents processus. [16]

III. Système cardio-pulmonaire

A. Système cardiovasculaire

1. Rappel anatomique

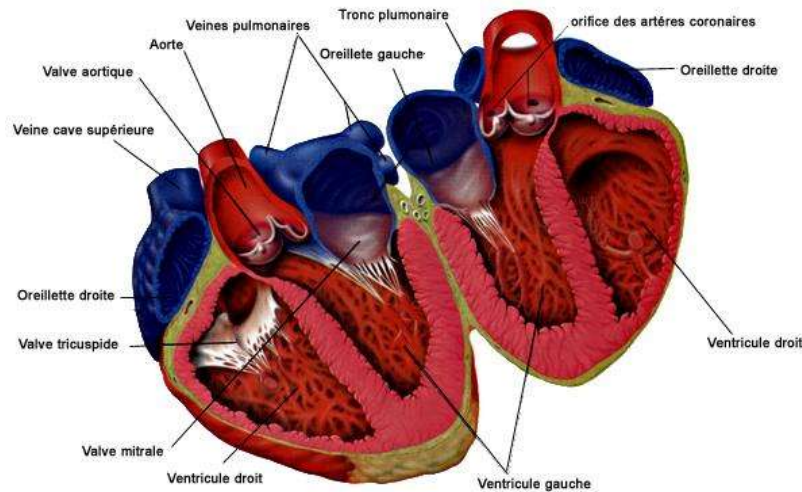


Figure 17 - Anatomie du cœur. [18]

Le cœur est un organe musculaire contenu dans un sac fibreux, le péricarde, et localisé dans le thorax. Une autre membrane fibreuse, étroitement accolée au cœur, est appelée épicaarde. L'espace très réduit qui sépare péricarde et épicaarde est rempli d'un liquide aqueux qui sert de lubrifiant facilitant les mouvements du cœur au sein de son sac.

Les parois du cœur sont composées essentiellement de cellules musculaires cardiaques (myocytes), constituant le myocarde. La surface interne des cavités (ou chambres) cardiaques, ainsi que la paroi interne de tous les vaisseaux sanguins, est tapissée d'une fine couche de cellules appelées cellules endothéliales ou endothélium.

Le cœur humain est divisé en deux moitiés, droite et gauche, chacune étant formée d'une oreillette et d'un ventricule. Entre l'oreillette et le ventricule, dans chaque moitié du cœur, on trouve des valves atrioventriculaires (AV) qui permettent le passage du sang de l'oreillette vers le ventricule, mais non dans l'autre sens. La valve AV droite est appelée valvule tricuspide, car elle est constituée de trois valvules fibreuses ou cuspidés. La valve AV gauche a deux valvules et est donc appelée valve bicuspidée. Sa ressemblance avec la mitre d'un évêque lui a valu son nom courant de valve mitrale.

L'ouverture et la fermeture des valves AV sont un processus passif qui ne résulte que des différences de pression régnant de part et d'autre des valves. Quand la pression du sang dans une oreillette dépasse celle dans le ventricule correspondant, la valve est ouverte et le

flux se fait de l'oreillette vers le ventricule. Inversement, quand la contraction ventriculaire fait que la pression ventriculaire dépasse celle de l'oreillette correspondante, la valve qui les sépare est fermée.

Ainsi, le sang ne reflue normalement pas des ventricules vers les oreillettes mais passe dans le tronc pulmonaire pour le ventricule droit et dans l'aorte pour le ventricule gauche. Les ouvertures du ventricule droit vers le tronc pulmonaire ou du ventricule gauche vers l'aorte portent également des valves, les valves pulmonaires et aortiques. Ces valves laissent passer le sang dans les artères au cours de la contraction ventriculaire, mais elles empêchent le déplacement inverse au cours de la relaxation ventriculaire.

Les vaisseaux qui acheminent du sang oxygéné au cœur naissent de la partie postérieure des cupules de la valve aortique. [17]

2. Les deux circulations

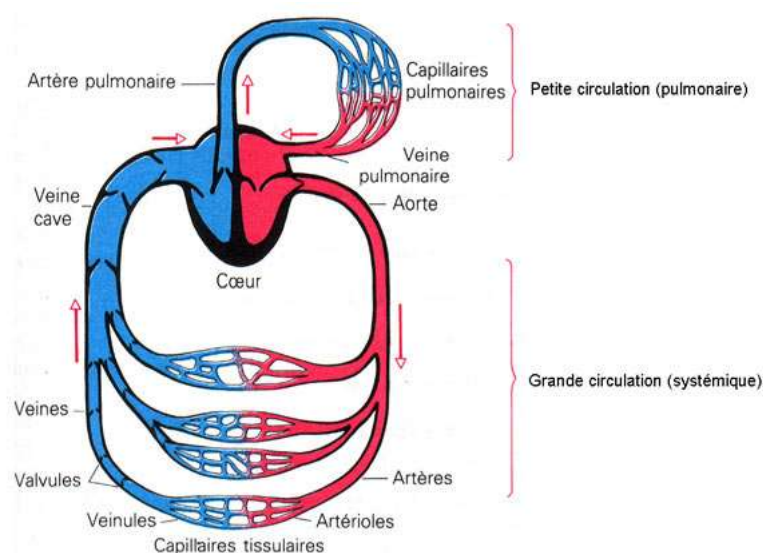


Figure 18 - La double circulation sanguine. [19]

Chez l'homme, le sang parcourt un circuit fermé : il est éjecté du ventricule gauche du cœur dans l'aorte et dans ses branches de division, traverse les capillaires et revient à l'oreillette droite par le système des deux veines caves. Ce circuit forme la grande circulation ou circulation générale (ou circulation systémique), qui pourvoit à l'apport sanguin de tous les tissus, et sur laquelle se greffe en parallèle la circulation propre à chaque organe. Parvenu dans le ventricule droit, le sang est propulsé dans l'artère pulmonaire, franchit les capillaires pulmonaires, où ont lieu les échanges gazeux, et, par les veines pulmonaires, retourne à

l'oreillette gauche. C'est la petite circulation ou circulation pulmonaire, qui renouvelle les gaz du sang.

La circulation pulmonaire amène le sang veineux (sang pauvre en oxygène et riche en gaz carbonique) au contact des alvéoles pulmonaires pour le réoxygéner totalement et éliminer son gaz carbonique en excès. Elle s'effectue par l'artère pulmonaire qui naît du ventricule droit et se subdivise en un grand nombre de branches, se ramifiant elles-mêmes en une multitude de capillaires. Après s'être réoxygéné, le sang regagne le cœur par des veinules, des veines puis de grosses veines pulmonaires (au nombre de quatre), qui débouchent dans l'oreillette gauche. La petite circulation fonctionne à basse pression, la pression maximale ne dépasse pas normalement 25 mm Hg (millimètres de mercure) dans l'artère pulmonaire.

La circulation générale (systémique) amène aux cellules le sang artériel, riche en oxygène et pauvre en gaz carbonique. Elle se fait par l'aorte, qui naît du ventricule gauche et donne elle-même naissance à un grand nombre de branches (artères, artérioles) qui irriguent l'ensemble de l'organisme. Une fois les échanges entre oxygène et gaz carbonique effectués dans les organes à travers les parois des capillaires, le sang regagne le cœur par l'intermédiaire de veinules, de veines puis de veines de gros calibre, qui débouchent, pour la moitié inférieure du corps, dans la veine cave inférieure, pour la moitié supérieure du corps, dans la veine cave supérieure. Les deux veines caves se jettent dans l'oreillette droite. La grande circulation est un système à haute pression. La pression maximale atteint chez le sujet normal 100 à 140 mm Hg dans l'aorte et dans ses branches. [20]

3. Le muscle cardiaque

a) Structure cellulaire

Le muscle cardiaque combine des propriétés à la fois du muscle squelettique et du muscle lisse. Comme le muscle squelettique, il a un aspect strié dû à la présence de sarcomères répétitifs composés de filaments épais contenant de la myosine s'intercalant avec des filaments fins contenant de l'actine. On retrouve également de la troponine et de la tropomyosine dans le filament fin, et ces filaments ont le même rôle que dans le muscle squelettique. Les membranes cellulaires contiennent un système de tubules T et un réticulum sarcoplasmique chargé en calcium.

Toutefois, le mécanisme par lequel ces membranes interagissent pour libérer le calcium est différent que dans le muscle squelettique. Comme la cellule musculaire lisse, la

cellule individuelle du muscle cardiaque est relativement petite (100 µm de long et 20 µm de diamètre) et contient habituellement un seul noyau. Les cellules adjacentes se rejoignent bout à bout au niveau des structures appelées disques intercalaires, dans lesquels on trouve des desmosomes qui ancrent les cellules ensemble et sur lesquelles s'attachent les myofibrilles (figure 19). On trouve également dans les disques intercalaires des jonctions communicantes similaires à celles des unités uniques de muscle lisse.

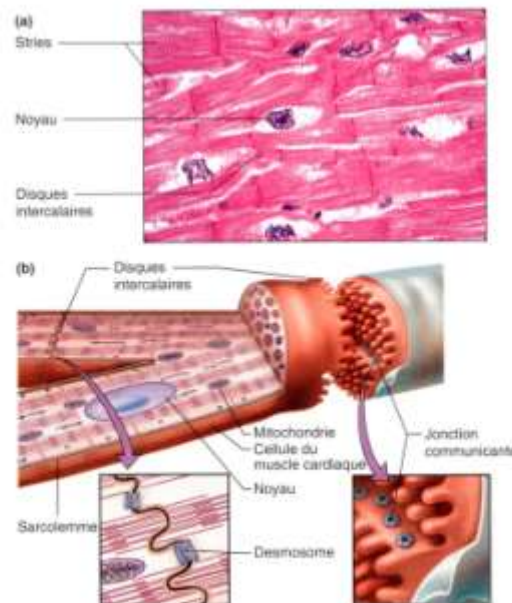


Figure 19 - Muscle cardiaque. [21]

(a) Microscopie optique.

(b) Myocytes cardiaques et disques intercalaires.

Les cellules musculaires cardiaques sont également disposées en couches et entourent les cavités creuses. Quand le muscle des parois des cavités cardiaques se contracte, il agit comme une main qui se serre et exerce une pression sur le sang qu'elles contiennent.

b) Couplage excitation-contraction dans le muscle cardiaque

Comme dans le muscle squelettique, la contraction des cellules musculaires cardiaques survient en réponse à un potentiel d'action membranaire qui se propage le long des tubules T. La dépolarisation au cours des potentiels d'action des cellules musculaires cardiaques est en partie due à un influx d'ions Ca^{2+} à travers des canaux potentiels dépendants. Ces canaux calciques appelés canaux calciques de type L, sont en fait des versions modifiées des récepteurs à la dihydropyridine qui se comportent comme des senseurs du potentiel au cours du couplage excitation-contraction dans la cellule musculaire squelettique.

Le calcium entrant participe à la dépolarisation de la membrane plasmique et induit une légère augmentation de la concentration cytosolique de calcium, mais il sert également de facteur déclenchant pour la libération d'une quantité beaucoup plus importante de calcium par le réticulum sarcoplasmique. Cela est possible parce que des récepteurs à la ryanodine des sacs latéraux du réticulum sarcoplasmique cardiaque sont des canaux calciques qui, au lieu d'être ouverts directement par le potentiel comme dans le muscle squelettique, le sont par la fixation du calcium déclenchant dans le cytosol.

Une fois la concentration cytosolique en Ca^{2+} élevée, il apparaît une activation du filament fin, un cycle des ponts transversaux et la génération d'une force par les mêmes mécanismes de base que ceux qui ont été décrits pour le muscle squelettique. [21]

4. Paramètres cardiaques

a) Débit cardiaque

Le débit cardiaque (Q_c) est défini comme la quantité de sang qui sort de l'aorte par minute. Il dépend du volume de sang éjecté à chaque contraction (« systole ») du cœur, ce volume étant appelé le « volume d'éjection systolique » (VES) et du nombre de battements cardiaques par minute, appelé la « fréquence cardiaque ». On peut illustrer ceci par l'équation suivante :

$$Q_c (\text{mL/min}) = FC (\text{bpm}) \times \text{VES} (\text{mL/bt})$$

Où FC est la fréquence cardiaque en battements par minute (bpm) et VES le volume d'éjection systolique en millilitres (mL par battement : mL/bt).

b) Le volume d'éjection systolique

Dans un cœur de sédentaire en bonne santé, l'étendue des valeurs normales du volume d'éjection systolique est de 70 à 90 mL de sang par battement. Il faut cependant souligner que des marathoniens, cycliste sur route et autres sportifs spécialistes des sports d'endurance ont des volumes d'éjection systoliques maximaux de l'ordre de 125 mL soit, pour mémoire, l'équivalent d'un pot de yaourt de sang qui serait expulsé du ventricule gauche à chaque battement cardiaque. Le volume d'éjection systolique augmente avec l'intensité de l'exercice jusqu'à 40-60 % de VO_2 max, puis reste en plateau. Le débit cardiaque augmente ensuite grâce à la fréquence cardiaque qui croît proportionnellement à la consommation d'oxygène jusqu'à VO_2 max.

c) Fréquence cardiaque

L'augmentation du débit cardiaque est rendue possible par celle de la fréquence cardiaque qui est utilisée comme repère de l'intensité de l'exercice (en % de la VO_2 max). La fréquence cardiaque maximale diminue de façon linéaire après 30 ans environ, et, par conséquent le débit cardiaque, sauf si le volume d'éjection systolique (VES) maximal augmente avec l'entraînement en endurance. La baisse de la fréquence cardiaque maximale est calculée de façon théorique (pas toujours vérifiée chez le sportif) selon la formule d'Astrand et Rhyning (1954) : $FC_{max} = 220 \text{ battements par minute (bpm)} - \text{l'âge (années)}$.

Ainsi, selon cette formule, à 20 ans la fréquence cardiaque maximale est de 200 bpm, alors qu'à 40 ans elle ne serait plus que de 180 bpm. Ceci n'est pas toujours vérifié chez les sportifs régulièrement entraînés à faire des exercices physiques qui sollicitent leur consommation maximale d'oxygène et donc leur fréquence cardiaque.

En effet, chez des cyclistes de 40-45 ans courant en compétition à un niveau régional, la fréquence cardiaque maximale peut atteindre 190-195 bpm au lieu des 175-180 bpm prévus par l'équation d'Astrand et Rhyning. Donc, cette équation basée sur une simple analyse statistique n'est utile qu'en théorie car une fréquence de 170 bpm, chez un adolescent ou un adulte de 45 ans ne signifie pas la même intensité relative de l'exercice.

d) Réserve Cardiaque

La réserve cardiaque est définie comme la différence entre le débit cardiaque maximal et le débit cardiaque de repos. Ainsi, plus la différence (la réserve) est grande, plus la consommation d'oxygène peut s'élever au dessus de la valeur de repos, ce qui signifie que le sujet est capable de fournir une puissance d'exercice importante à son débit cardiaque maximal, correspondant alors à une consommation maximale d'oxygène importante.

En considérant l'équation du débit cardiaque :

$$Q_c = VES \times FC$$

Il est possible de noter que « la réserve cardiaque » est directement influencée par la fréquence cardiaque et le volume d'éjection systolique. Ainsi, afin d'assurer une réserve cardiaque importante, la fréquence cardiaque devra être la plus basse possible au repos et la plus élevée possible à sa valeur maximale, alors que le volume d'éjection systolique devra être plus élevé possible à sa valeur maximale. Certains types d'entraînement, notamment

l'enchaînement de trois à cinq répétitions de 3 minutes à 90-100 % de VO_2 max, permettent d'améliorer le débit cardiaque maximal. [22]

5. Répartition du débit cardiaque lors d'un effort physique

Lors d'efforts physiques, les besoins en oxygène augmentent. Le nombre de globules rouges étant fixe, il faut un autre moyen efficace, rapide, pour augmenter la quantité d' O_2 amenée vers les zones déficitaires. La solution se trouve donc au niveau du cœur et de ses caractéristiques. [23]

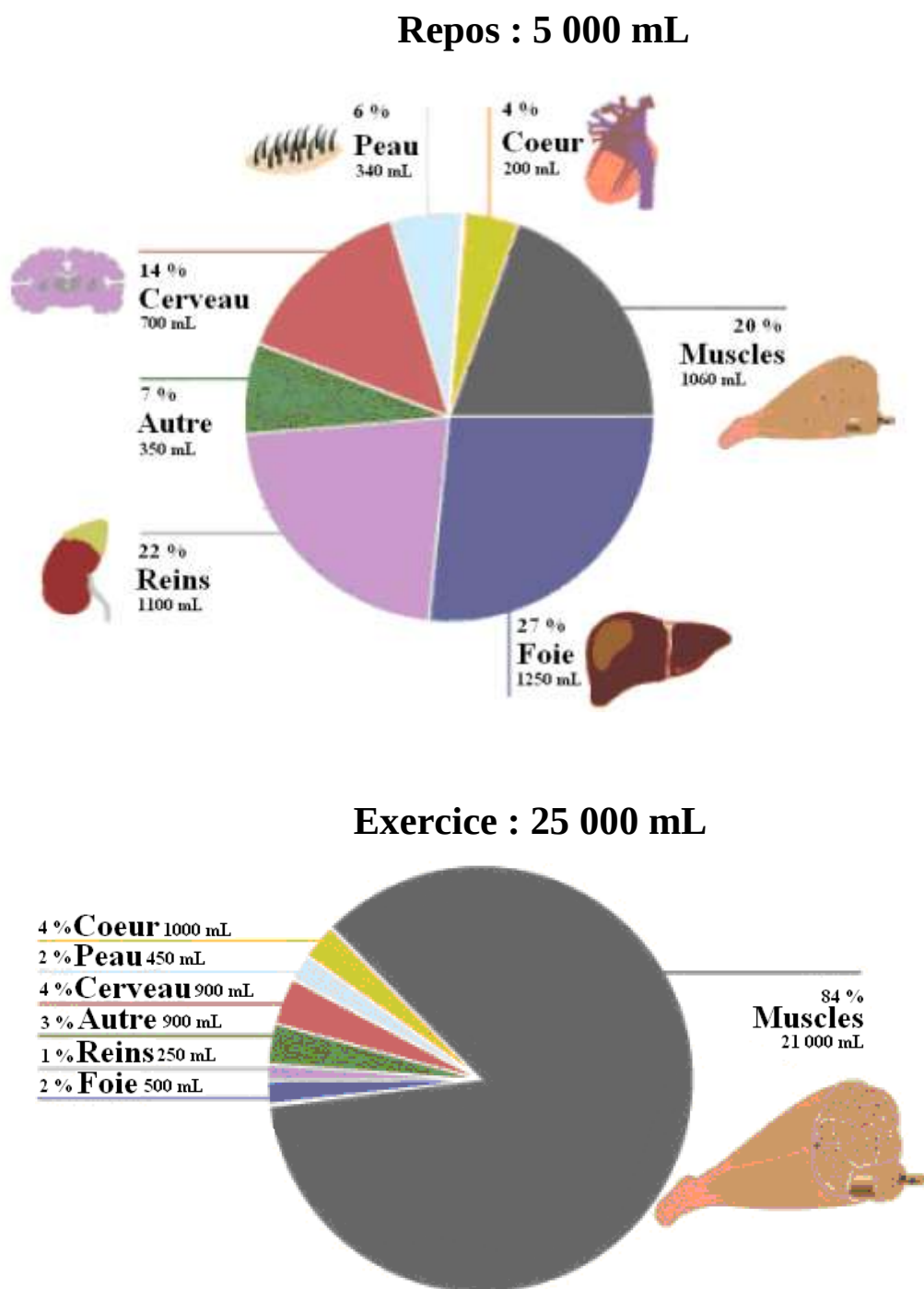


Figure 20 – Répartition du flux sanguin dans l'organisme au repos et lors de l'exercice physique. [24]

Au niveau vasculaire, la libération de l'adrénaline par les fibres adrénergiques entraîne une vasoconstriction au niveau de la peau, des intestins, du foie et des reins. La stimulation des fibres cholinergiques induit une vasodilatation au niveau des muscles squelettiques et du cœur. Cela induit des modifications au niveau de la répartition du flux sanguin dans l'organisme.

Au repos, les muscles n'utilisent qu'environ 20 % des 5 L de sang éjectés par le cœur à chaque minute. Le reste est réparti entre le foie, les reins, le cerveau, la peau, d'autres organes et le cœur lui-même. Il ne faut pas oublier que le cœur est une pompe, dont l'activité contractile permet cette fonction, et qu'il faut bien que lui aussi en soit correctement bien irrigué.

Pendant l'exercice, la vasodilatation va permettre aux les muscles de recevoir un débit sanguin plus important. Environ 80 % du débit sanguin est distribué aux muscles actifs. A toute fin utile, l'organisme privilégie donc fort logiquement l'irrigation de la partie du corps qui nécessite d'être la plus efficace à cet instant donné dédié à la réalisation d'un exercice physique important : les muscles eux-mêmes.

Mais ce ne sont pas les seules parties de l'organisme dont il faut privilégier l'irrigation sanguine pendant l'exercice. Le cœur doit être capable de répondre favorablement à une augmentation de sa sollicitation durant l'exercice. Même s'il reste à un pourcentage d'utilisation du débit identique aux conditions de repos, le débit étant augmenté, le cœur bénéficie au final d'une irrigation beaucoup plus importante durant l'exercice.

De la même façon, l'irrigation du cerveau doit être préservée durant l'exercice. Pas question de le sacrifier sous prétexte qu'il n'est pas beaucoup utilisé par le sportif. Si la proportion du débit sanguin qui lui est réservée diminue durant l'exercice, l'irrigation effective est en réalité légèrement augmentée du fait de l'augmentation du débit global.

Enfin, la peau voit la proportion de débit sanguin qui lui est réservée diminuer au cours de l'exercice mais son irrigation globale reste augmentée. Son rôle dans la dispersion de la chaleur accumulée durant l'exercice n'est pas à négliger.

En dehors de ces organes particuliers, les autres voient leur irrigation diminuer durant l'exercice. L'organisme fait ainsi le choix de privilégier les organes dont il faut absolument préserver le fonctionnement, au détriment des autres. Ainsi, l'irrigation du système digestif

diminue significativement, même si le débit sanguin global augmente, expliquant les troubles digestifs souvent observés lors de compétitions d'endurance ou d'ultra endurance.

Si le débit sanguin augmente au cours de l'exercice physique, c'est notamment grâce à l'effet inotrope positif induit par la libération des catécholamines. L'augmentation de la force de contraction du cœur, et notamment du ventricule gauche, permet d'éjecter une plus grande quantité de sang à chaque systole.

La fréquence cardiaque et le volume d'éjection systolique augmentant au cours de l'exercice physique, le débit cardiaque augmente aussi. Il peut passer de 5 L/min au repos à environ 40 L/min au cours d'un exercice maximal chez le sportif de haut niveau. On retrouve cette valeur si on prend l'exemple d'un sportif dont la fréquence cardiaque maximale est de 200 batts/min et le volume sanguin éjecté à chaque systole de 200 mL. [24]

B. Système respiratoire

1. Rappel anatomique

Les poumons sont situés dans la cage thoracique et font suite à la trachée qui prolonge le larynx et se divise en deux bronches souches droite et gauche qui entrent dans le poumon correspondant.

Dans le poumon, les voies aériennes continuent de se diviser en branches de plus en plus nombreuses, courtes et fines, à la manière des ramifications des branches d'un arbre. Les plus petites bronches sont appelées bronchioles et s'ouvrent sur les alvéoles pulmonaires, petites cavités aériennes où a lieu l'échange de gaz entre l'air et le sang.

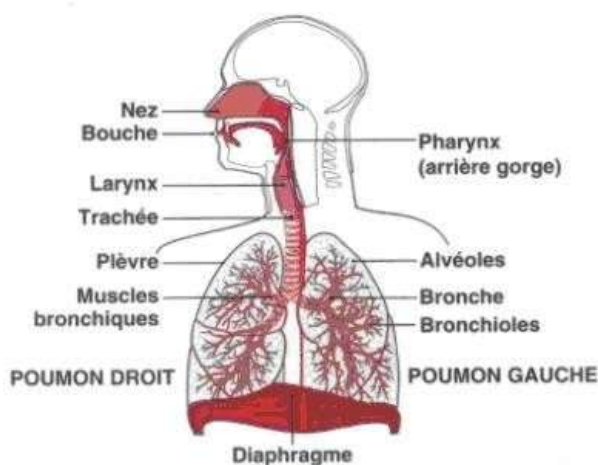


Figure 21 - Anatomie des voies aériennes. [26]

La paroi thoracique est formée de douze paires de côtes qui rejoignent le sternum en avant et les vertèbres dorsales en arrière. Ce grill costal représente une protection osseuse. Le diaphragme est un muscle qui forme le plancher de la cavité thoracique. L'ensemble des structures anatomiques participent au fonctionnement des poumons et à leur rôle dans les échanges gazeux.

Des capillaires sanguins forment un réseau dense autour des alvéoles et permettent les échanges oxygène/gaz carbonique (O_2/CO_2). [25]

2. Respiration

Le rôle essentiel de la respiration est de procurer de l' O_2 aux cellules de l'organisme et d'éliminer le CO_2 qu'elles produisent. La plupart des gens pensent que la respiration consiste à inspirer et expirer. En physiologie, le sens du mot respiration est plus étendu. La respiration comprend deux processus séparés mais apparentés : la respiration cellulaire et la respiration externe.

Par respiration cellulaire on entend les événements métaboliques intracellulaires qui ont lieu dans les mitochondries et qui consomment de l' O_2 et donnent naissance à du CO_2 lors de la production d'énergie à partir des molécules de nutriments.

La séquence complète d'événements mis en jeu dans l'échange d' O_2 et de CO_2 entre les cellules de l'organisme et l'environnement porte le nom de respiration externe. Celle-ci, comporte quatre étapes :

- Dans les poumons, il y a alternance d'entrée et de sortie d'air de sorte qu'il y a échange d'air entre l'atmosphère (environnement extérieur) et les sacs alvéolaires (alvéoles). La ventilation est ajustée de telle façon que le débit d'air entre l'environnement et les alvéoles soit asservi aux besoins métaboliques de l'organisme représentés par la consommation d' O_2 et la production de CO_2 .

- L' O_2 et le CO_2 sont échangés par diffusion entre le gaz alvéolaire et le sang contenu dans les capillaires pulmonaires.

- L' O_2 et le CO_2 sont transportés par le sang circulant entre les poumons et les tissus.

- L' O_2 et le CO_2 sont échangés par diffusion entre les capillaires systémiques et les cellules des tissus.

L'appareil respiratoire n'est pas impliqué dans toutes les étapes ci-dessus ; il l'est uniquement dans la ventilation et l'échange d' O_2 et de CO_2 entre le gaz alvéolaire et le sang dans les poumons (étapes 1 et 2). Les autres étapes sont le fait de l'appareil circulatoire. [27]

3. Cycle respiratoire

La respiration (ou ventilation) pulmonaire est organisée en deux étapes :

- l'*inspiration*, processus actif, permet d'augmenter le volume thoracique, de diminuer ainsi la pression intrathoracique et de provoquer un afflux d'air dans les voies respiratoires et les poumons ;
- l'*expiration*, processus en grande partie passif, consiste à laisser le thorax retrouver sa configuration de repos, ce qui diminue le volume, augmente la pression et provoque l'expulsion de l'air vers l'extérieur.

L'inspiration est réalisée par la contraction du diaphragme, des muscles intercostaux et éventuellement des autres muscles (muscles inspiratoires accessoires). L'expiration se réalise par cessation de l'activité de ces muscles et elle peut être accentuée par la contraction volontaire d'autres groupes musculaires (muscles expiratoires accessoires).

Une inspiration suivie d'une expiration forment un *cycle respiratoire*. Ces deux étapes se succèdent régulièrement à une fréquence approximative de 14 cycles par minute. La fréquence respiratoire augmente pendant l'effort et diminue au repos et pendant le sommeil, en suivant les besoins énergétiques de l'organisme.

4. Volumes et capacités respiratoires

Une inspiration normale permet de faire entrer dans les poumons un volume d'air de 500 mL. Une expiration normale en fait sortir autant. Ce volume est qualifié de *volume courant*.

Une inspiration forcée, volontaire, fait entrer en action les muscles inspiratoires accessoires et permet d'introduire dans les poumons un volume *supplémentaire* de 3000 mL. C'est le *volume inspiratoire de réserve*.

Une expiration forcée, volontaire, fait entrer en action les muscles expiratoires accessoires et permet d'expulser un volume supplémentaire d'air de 1000 à 1100 mL. C'est le *volume expiratoire de réserve*.

Même à la fin d'une expiration forcée, il reste dans les poumons un volume d'air qui permet de maintenir les alvéoles ouvertes. Ce volume est en moyenne de 1200 mL et constitue le *volume résiduel*.

Le volume courant (500 mL) plus le volume inspiratoire de réserve (3000 mL) constitue la *capacité inspiratoire*, c'est-à-dire le volume maximal d'air qu'une personne

normale peut introduire dans ses poumons par une inspiration forcée survenant après une expiration normale. Ce volume est de 3500 mL.

Le volume expiratoire de réserve (1100 mL) plus le volume résiduel (1200 mL) forment la *capacité résiduelle*, soit le volume d'air qui reste dans les poumons après une expiration normale. Ce volume est de 2300 mL.

Le volume maximal d'air qu'une personne peut véhiculer par une inspiration forcée suivie d'une expiration forcée constitue la *capacité vitale*. Elle est formée du volume courant (500 mL), du volume inspiratoire de réserve (3000 mL) et du volume expiratoire de réserve (1100 mL). La capacité vitale est donc de 4600 mL.

La *capacité pulmonaire totale* est le volume maximal que le poumon peut recevoir après une inspiration forcée. Il est égal à la capacité vitale (4600 mL) plus le volume résiduel (1200 mL). Elle est donc de 5800 mL.

L'ensemble de ces volumes et capacités sont de 20 à 25 % moindres chez la femme. L'étude de ces volumes se fait par spirométrie, le spiromètre étant un appareil capable d'enregistrer les volumes de gaz mobilisés lors du cycle respiratoire.

L'air qui pénètre dans les poumons à chaque respiration se mélange à l'air de la capacité résiduelle, si bien que la concentration en oxygène de l'air arrivant au contact des alvéoles est toujours moindre que celle de l'air inspiré.

L'air inspiré n'arrive pas intégralement dans les poumons car une partie reste dans les voies respiratoires (pharynx, larynx, trachées et bronches). Cet espace est l'*espace mort* et son volume est en moyenne de 150 mL.

Les mouvements respiratoires nécessitent une consommation d'énergie. Au repos, celle-ci représente seulement 4 % de la production d'énergie de l'organisme. Pendant l'effort soutenu, cette consommation peut augmenter de plusieurs dizaines de fois et devenir le principal élément limitant l'accélération du rythme respiratoire. [28]

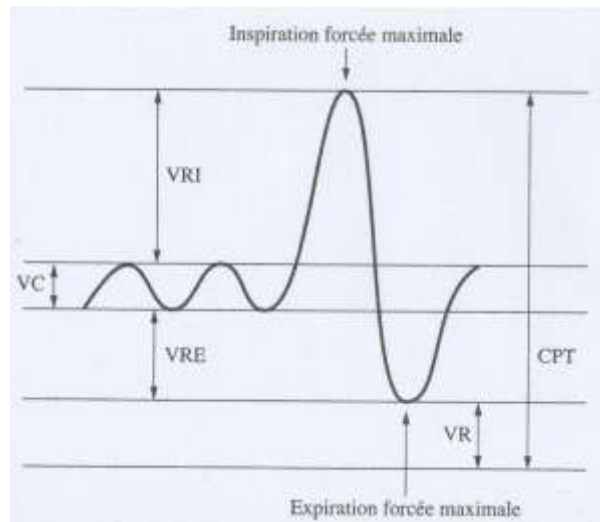


Figure 22 – Paramètres respiratoires. [28]

Légende :

VC : Volume courant

VRI : Volume de Réserve Inspiratoire

VRE : Volume de Réserve Expiratoire

VR : Volume résiduel

CPT : Capacité Pulmonaire Totale

5. Diffusion et échanges gazeux

Bien qu'une partie d'O₂ et de CO₂ soit transportée dans le sang sous forme dissoute (moins de 1 % et 3 % respectivement), la plus grande partie de ces gaz est transportée dans le sang (à 99 %) par l'hémoglobine pour l'oxygène sous forme d'oxyhémoglobine (HbO₂), et sous forme de bicarbonate, HCO₃⁻ pour 78 % du CO₂.

a) Transport de l'oxygène

- *L'hémoglobine*

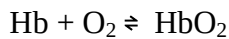
L'hémoglobine (Hb) est une protéine contenue dans les globules rouges comprenant quatre sous-unités composées de fer qui se combinent de façon réversible avec une molécule d'oxygène. Un gramme d'Hb peut fixer 1,34 mL d'O₂. Ainsi, la quantité d'oxygène qui peut être transportée par unité de volume du sang dépend de la concentration en hémoglobine. La concentration normale d'hémoglobine d'un homme et d'une femme en bonne santé est respectivement d'environ 150 et 130 grammes par litre de sang. Puisqu'un gramme d'Hb peut fixer 1,34 mL d'O₂, la capacité de transport de l'oxygène serait pour l'homme et la femme d'environ 200 mL et 174 mL par litre de sang.

Cependant, l'hémoglobine n'est pas saturée à 100 % (mais à 98 % au repos pour des exercices légers accomplis au niveau de la mer). Il faut donc considérer ce que l'on appelle « la courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine (HbO₂) ».

- *Oxyhémoglobine/ Hémoglobine*

La combinaison de l'oxygène avec l'hémoglobine dans les capillaires alvéolaires (poumons) est une forme de recharge du sang en oxygène, alors que la libération de l'oxygène depuis l'hémoglobine (dans les tissus actifs comme les muscles) est appelée la décharge du sang en oxygène.

Ces termes un peu imagés permettent de mieux entrevoir l'association et la dissociation de l'hémoglobine avec l'oxygène (oxyhémoglobine) selon le schéma suivant :



Où Hb est l'hémoglobine, et HbO₂ l'hémoglobine liée avec une molécule d'oxygène ou oxyhémoglobine.

Ainsi, une valeur élevée de PaO₂ (pression partielle en oxygène) entraîne la réaction vers la droite, alors qu'une valeur basse de la PaO₂ ainsi qu'une baisse de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène l'entraînent vers la gauche, c'est-à-dire vers une dissociation de l'oxyhémoglobine en hémoglobine et en oxygène, ce dernier étant libéré pour être utilisé dans les tissus par le métabolisme.

L'effet de la valeur de la PaO₂ sur le sens de la réaction est illustré par la fameuse courbe de « dissociation de l'oxyhémoglobine » représentée en figure 23. Cette courbe à la forme d'un « S » est dite sigmoïde.

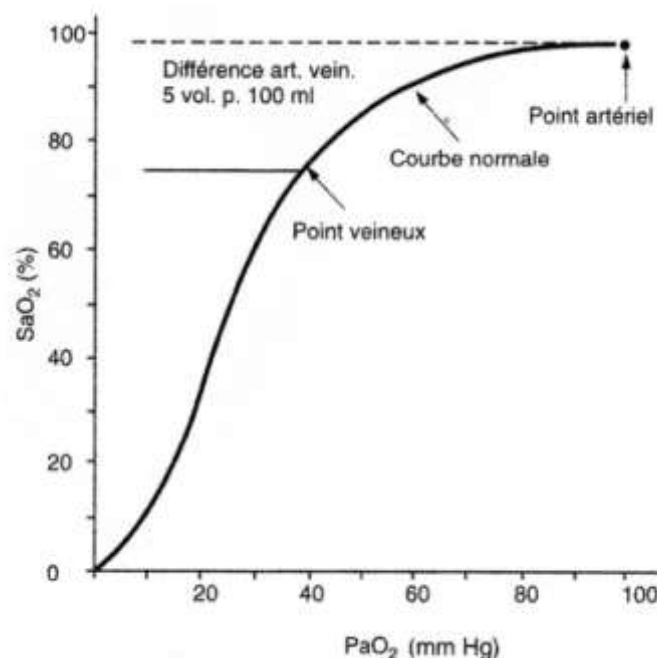


Figure 23 – Courbe de dissociation de l'hémoglobine. [29]

Dans la partie haute et plate du « S », la baisse de la PaO₂ n'aura qu'un infime effet sur la diminution de l'HbO₂ (dans le sens gauche de la flèche de la réaction décrite

précédemment). Le second intérêt de cette forme sigmoïde et cette fois-ci représentée par la partie verticale du « S » qui montre que, pour une pression en oxygène de 0 à 40 mm Hg, le pourcentage de saturation en oxygène de l'hémoglobine (SaO_2) augmente très rapidement. Or, la pression veineuse en oxygène est de 40 mm Hg, après que l'oxygène ait été utilisé par les muscles.

Donc pour 40 mm Hg de pression en oxygène du sang veineux (PvO_2), l'hémoglobine sera « gourmande » d'oxygène favorisant la recharge du sang en oxygène.

Lorsque la pression en oxygène atteint 90-100 mm Hg, il n'est plus guère possible d'augmenter le pourcentage de saturation de l'hémoglobine en oxygène, on arrive à une valeur de SaO_2 d'environ 97-98 %. [29]

La réduction de l'affinité de l'Hb pour l' O_2 dépend de plusieurs facteurs :

- la libération d'ions H^+
- l'élévation de la température

Ainsi, pour une même pression partielle en O_2 , on observe dans ces conditions une désaturation de l'Hb. La courbe de désaturation se déplace vers la droite. En présence d'une PaO_2 stable, il y a donc plus d'oxygène libéré au niveau des tissus. [30]

✓ Effet du pH sanguin : Effet Bohr

Le mécanisme qui explique l'effet Bohr est que les ions H^+ se lient plus facilement à l'hémoglobine que l'oxygène, prenant ainsi sa place. On dit alors que l'hémoglobine a une plus grande affinité pour les ions H^+ que pour l'oxygène.

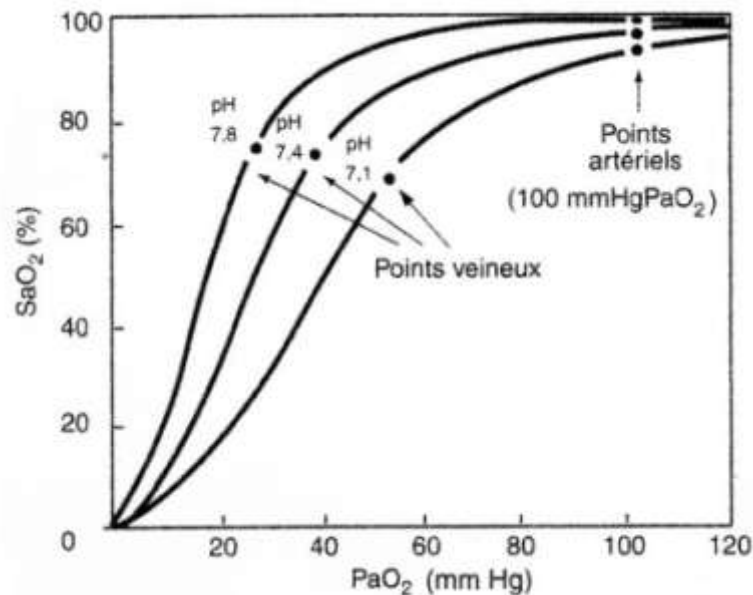


Figure 24 – L'effet Bohr. [31]

✓ Effet de la température

A pH constant, l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène est en relation inverse avec la température du sang. Concrètement, l'augmentation de température du sang, dans le cas où l'exercice physique se prolonge, entraîne la libération de l'oxygène fixé sur l'hémoglobine. La courbe de dissociation est alors déplacée vers la droite, comme pour l'effet Bohr. Il faudrait une pression partielle d'oxygène (PaO_2) plus importante pour avoir le même pourcentage de saturation de l'hémoglobine en oxygène (SaO_2). Cela va dans le sens d'une plus grande mise à disposition de l'oxygène pour les tissus actifs, en rapport avec les besoins accrus par l'augmentation du métabolisme. [31]

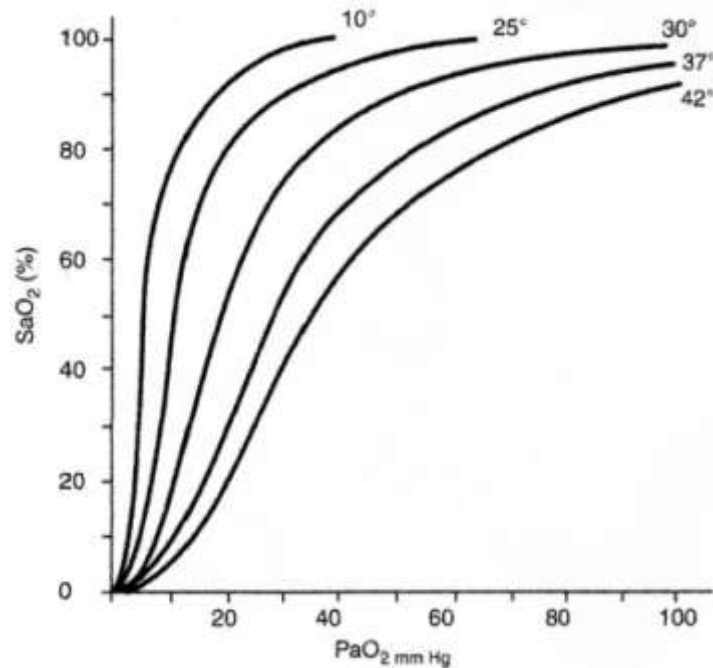


Figure 25 – Relation entre SaO₂ (%) et PaO₂ à différentes températures. [31]
Pour une même valeur de SaO₂ (%) dans le sang artériel, PaO₂ varie considérablement si la température s'abaisse de 37° à 25°.

- *Transport de l'oxygène dans le muscle*

La myoglobine (protéine) est le transporteur de l'oxygène dans les muscles squelettique et cardiaque, à l'image de l'hémoglobine dans le sang. En effet, la myoglobine agit comme une navette intracellulaire pour l'oxygène, le transportant de la membrane cellulaire musculaire jusqu'aux mitochondries qui l'utilisent dans la chaîne respiratoire. Les fibres lentes, dont le métabolisme aérobie est élevé, contiennent davantage de myoglobine que les fibres rapides. La différence de structure entre la myoglobine (4 fois plus légère) et l'hémoglobine a pour effet une plus grande affinité de la myoglobine pour l'oxygène.

C'est pourquoi la pente de courbe de dissociation de la myoglobine pour l'oxygène est plus raide pour les pressions du sang en oxygène inférieures à 20 mm Hg. Par conséquent, la myoglobine se décharge à de plus petites valeurs de la pression d'oxygène (PO₂) que l'hémoglobine, ce qui va dans le sens d'une plus grande mise à disposition de l'oxygène pour la mitochondrie. Cette différence d'affinité pour l'oxygène entre l'hémoglobine et la myoglobine contribue à assurer le convoyage de l'oxygène dans le sang pour le livrer ensuite aux cellules, par la myoglobine ; c'est pourquoi l'oxygène va facilement se détacher pour aller dans les mitochondries qui l'utiliseront comme accepteur final des ions H⁺. [31]

b) Formes de transport du gaz carbonique dans le sang

Le CO_2 est transporté dans le sang sous 3 formes : CO_2 dissous, bicarbonates (HCO_3^-) et combiné aux protéines pour former des composés carbaminés.

- *CO_2 dissous*

Comme le CO_2 est 20 fois plus soluble que l' O_2 , cette forme dissoute joue un rôle significatif dans le transport du CO_2 . Elle représente 5% du CO_2 transporté dans le sang veineux et 10% du CO_2 éliminé par les poumons.

- *HCO_3^-*

L'acide carbonique (H_2CO_3) se forme à partir du CO_2 et d' H_2O , lentement dans le plasma et rapidement dans les globules rouges grâce à la présence d'anhydrase carbonique (AC). L' H_2CO_3 se dissocie ensuite en HCO_3^- et H^+ . HCO_3^- sort du globule rouge en échange de Cl^- , alors que H^+ reste dans le globule rouge où il se lie à l'hémoglobine d'autant plus facilement qu'elle est désoxygénée (effet Haldane). Cette forme de transport représente 60% du CO_2 éliminé par les poumons.

- *Composés carbaminés*

Ils se forment par combinaison du CO_2 avec les groupements NH_2 terminaux des protéines, en particulier de la globine de l'hémoglobine ($\text{HbNH}_2 + \text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{HbNHCOOH}$). Là encore la réaction est favorisée par la désoxygénation de l'hémoglobine. Cette forme de transport représente 30% du CO_2 éliminé par les poumons. [32]

6. Régulation de la ventilation

La fréquence et l'amplitude de la respiration s'ajustent précisément en fonction des besoins métaboliques de l'organisme. Des circuits nerveux complexes transmettent des messages provenant des centres nerveux encéphaliques, des poumons et d'autres transducteurs répartis dans l'organisme, contribuant ainsi au contrôle de la respiration. De plus, certains éléments gazeux et chimiques du sang situés au niveau du tronc cérébral, et les chimiorécepteurs présents dans l'aorte et les artères carotides participent au contrôle de la respiration. Tout cela a pour effet, chez des individus en bonne santé, de maintenir constant le niveau de pression des gaz alvéolaires (et artériels), au cours d'une vaste gamme d'intensités d'effort. La figure 26 illustre schématiquement des signaux d'entrée destinés au contrôle de la ventilation.

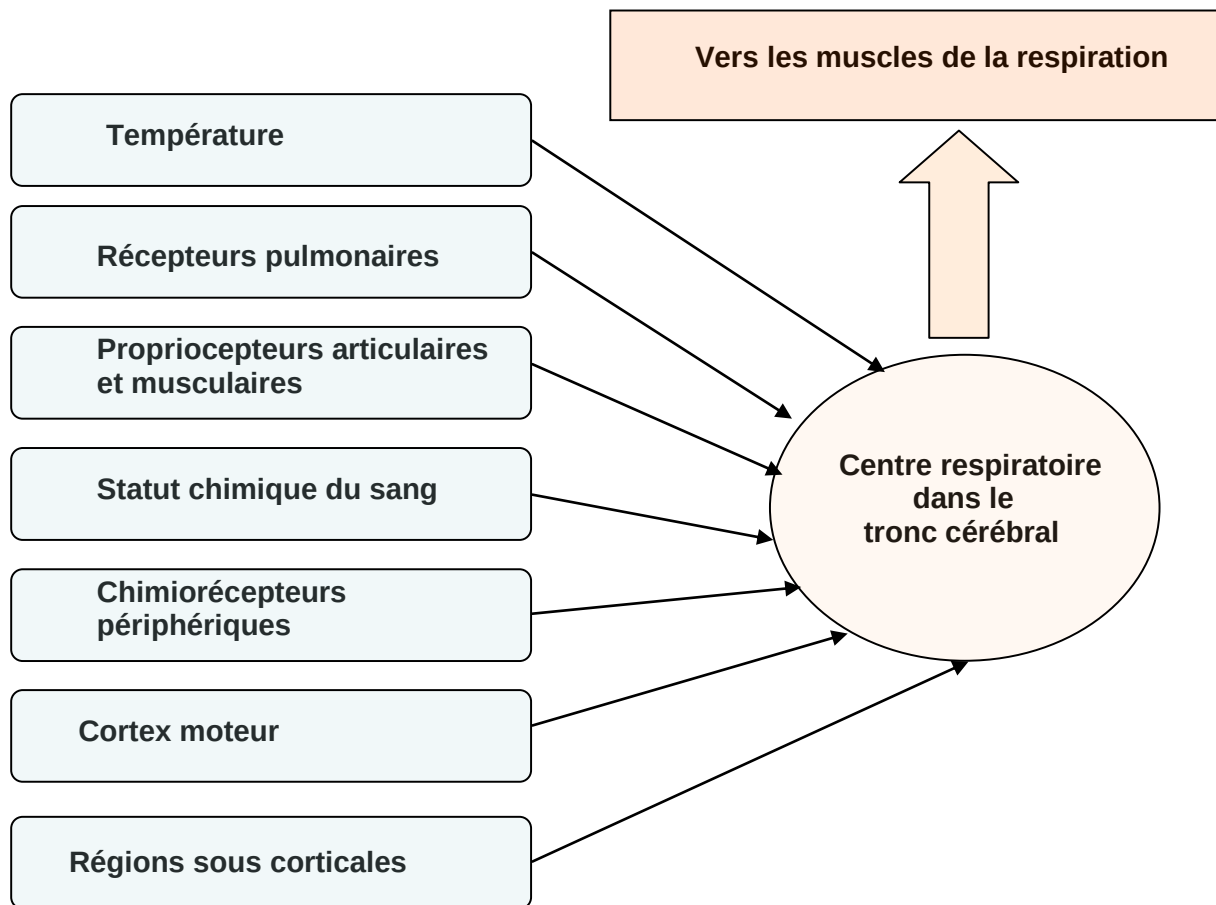


Figure 26 – Représentation schématique des mécanismes de contrôle du débit ventilatoire. [33]

a) Facteurs nerveux

Le cycle normal de la respiration dépend de l'activité intrinsèque et automatique de neurones inspiratoires dont les corps cellulaires sont situés dans la portion médiane du tronc cérébral. Ces neurones commandent la contraction du diaphragme et des muscles intercostaux et le gonflement des poumons. L'activité des neurones inspiratoires cesse à cause de leur limite intrinsèque et à cause de l'influence inhibitrice des neurones expiratoires, également localisés dans le tronc cérébral. L'activité normale des neurones du tronc cérébral est sujette à des influences inhibitrices et excitatrices d'origines diverses.

Avec l'augmentation du volume des poumons, les récepteurs intra-pulmonaires, particulièrement ceux des bronchioles, sont stimulés. Ces récepteurs transmettent leur message à des fibres nerveuses afférentes qui inhibent l'inspiration et stimulent l'expiration.

Lorsque les muscles qui participent à l'inspiration se décontractent, l'expiration se produit grâce à la rétraction passive du tissu musculaire étiré et à l'abaissement des côtes. L'activité des neurones expiratoires et des muscles qui en dépendent se synchronisent sur cette phase passive.

Au fur et à mesure que l'expiration se poursuit, le centre nerveux de l'inspiration est relevé de son inhibition et reprend son activité.

L'activité intrinsèque du centre respiratoire n'est pas suffisante pour ajuster la respiration aux besoins métaboliques. Un centre nerveux hypothalamique intègre les signaux provenant des aires motrices des hémisphères cérébraux, de la protubérance annulaire et d'autres régions cérébrales et ajuste la durée et l'intensité du cycle inspiratoire.

En même temps, des signaux déclenchés par des stimuli mécaniques et/ou chimiques dans les muscles actifs donnent, via le cervelet, un feed-back périphérique au centre respiratoire qui ajuste le débit ventilatoire à l'intensité de l'effort.

b) Facteurs sanguins

Au repos, la ventilation pulmonaire dépend surtout de la concentration sanguine de certaines substances chimiques.

Des modifications de la PO_2 et de la PCO_2 artérielles, de l'acidité et de la température activent les voies nerveuses sensibles dans le tronc cérébral et dans les artères, en vue d'ajuster la ventilation et de maintenir ainsi la concentration de certaines substances chimiques à l'intérieur de limites très rapprochées.

- *PO_2 plasmatique et chimiorécepteurs périphériques*

L'inspiration de mélange gazeux contenant 80 % d'oxygène augmente substantiellement la PO_2 alvéolaire et réduit d'environ 20 % le débit ventilatoire. Inversement, si on diminue la concentration en oxygène, la ventilation augmente, surtout si la PO_2 alvéolaire chute sous le niveau de 60 mm Hg. Il faut rappeler qu'à ce niveau de pression d'oxygène, le pourcentage de saturation d'hémoglobine s'abaisse rapidement.

Le centre respiratoire n'est pas sensible à la baisse de pression d'oxygène. De fait, le premier point de détection d'une hypoxie artérielle et de commencement d'un ajustement ventilatoire est situé au niveau des chimiorécepteurs périphériques. Ces neurones spécialisés, d'une masse de quelques milligrammes, sont situés au niveau de la crosse de l'aorte et à l'embranchement des artères carotides, dans le cou. Ces *corps carotidiens* sont stratégiquement localisés pour évaluer le statut chimique du sang avant qu'il n'irrigue le cerveau.

La diminution de la PO_2 artérielle, comme on l'observe en haute altitude ou en présence de maladie respiratoire, stimule les récepteurs aortiques et carotidiens qui provoquent une augmentation de la ventilation. A eux seuls, les chimiorécepteurs protègent l'organisme contre une diminution de la PO_2 de l'air inspiré.

En dehors de leur rôle d'avertisseur rapide en cas de diminution de la pression artérielle d'oxygène, ces chimiorécepteurs périphériques stimulent la ventilation même s'il

n'y a pas la diminution habituelle de la PO_2 artérielle. Cette activation est probablement due aux effets stimulants des corps carotidiens en présence d'une augmentation de la concentration de gaz carbonique, de la température, de l'acidité ainsi qu'une augmentation de la concentration de potassium dans le sang artériel au cours de l'exercice physique.

- *PCO_2 plasmatique et concentration d'hydrogène*

Au repos, le stimulus respiratoire le plus important est la pression du gaz carbonique dans le plasma artériel.

Une petite augmentation de la PCO_2 dans l'air inspiré entraîne une augmentation importante du débit ventilatoire. La ventilation de repos est presque doublée lorsque la PCO_2 de l'air inspiré augmente de 1,7 mm Hg, c'est à dire 0,22 % de CO_2 dans l'air inspiré.

Le contrôle de la ventilation par la PCO_2 artérielle ne s'effectue probablement pas par l'intermédiaire des molécules de gaz carbonique. Cette ventilation semble plutôt être soumise au contrôle de l'acidité plasmatique dont le niveau varie proportionnellement avec le contenu sanguin en gaz carbonique.

Il faut se rappeler que l'acide carbonique, formé par la combinaison de CO_2 et d' H_2O , se dissocie rapidement en ions bicarbonates (HCO_3^-) et hydrogène (H^+). L'augmentation de la concentration d'ions H^+ , spécialement dans le liquide céphalorachidien où se trouvent les centres respiratoires, stimule l'activité inspiratoire. Avec l'augmentation de la ventilation, le CO_2 est exhalé, ce qui entraîne une diminution de la concentration en ions H^+ . [33]

7. Evolution de la ventilation au cours de l'exercice physique

Au cours d'un exercice physique, le contrôle de la ventilation est multifactoriel (nerveux et chimique).

Lors d'un exercice réalisé à une intensité constante, la ventilation et notamment le débit ventilatoire s'ajustent en 3 phases :

- La 1^{ère} phase coïncide avec le début de l'exercice et correspond à une augmentation très brutale de la ventilation. Elle ne dure que quelques secondes. Cette phase est sous l'influence des informations envoyées par le cortex moteur et les muscles actifs vers le centre respiratoire.
- La 2^e phase correspond à une augmentation un peu moins importante de la ventilation. Cette phase dépend également de l'influence d'une activation centrale. Elle dure 3 à 4 minutes.

- La 3^e phase correspond à un ajustement durant le reste de l'exercice jusqu'à son arrêt. Les mécanismes de régulation sont opérationnels pour que la ventilation s'adapte aux besoins en oxygène des cellules, le rejet du CO₂ produit et compense l'acidose métabolique induite par l'exercice.

L'évolution de la consommation d'oxygène au cours d'un exercice d'intensité constante est identique à celle d'un exercice de faible intensité. La courbe de VO₂ n'atteint pas instantanément le niveau de consommation correspondant aux besoins énergétiques des cellules. Durant une période de 3 à 4 minutes, la consommation d'O₂ est donc inférieure aux besoins réels.

La différence entre la consommation correspondant aux besoins et qui sera atteinte par la suite et celle du début de l'exercice correspond à ce qu'on appelle le déficit d'oxygène. Durant cette phase, la filière aérobie ne peut répondre seule à la re-synthèse énergétique car un certain délai est nécessaire à sa pleine activation et parce que la ventilation est insuffisante pour apporter suffisamment d'oxygène aux cellules. L'ATP est alors momentanément re-synthétisé par les filières anaérobies, même si l'intensité d'exercice est faible. Durant la suite de l'exercice, la consommation d'oxygène est stable, proportionnelle à l'intensité d'exercice et aux besoins cellulaires. Cependant, la récupération de la consommation de repos est exponentielle et rapide.

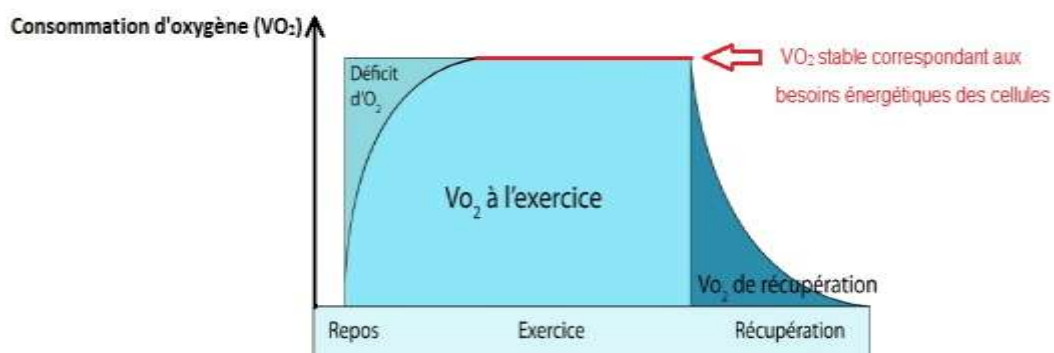


Figure 27 – Evolution de la consommation d'oxygène au cours d'un exercice de faible intensité. [34]

Lorsque l'intensité de l'exercice est très importante, les possibilités maximales de consommation d'oxygène sont dépassées. Le métabolisme aérobie ne peut alors suffire à la réalisation de l'exercice et c'est la filière anaérobie lactique qui fournit le reste de l'énergie nécessaire. La récupération de la consommation d'oxygène de repos est beaucoup plus longue, une phase lente pouvant durer plusieurs heures s'ajoutant à une phase rapide.

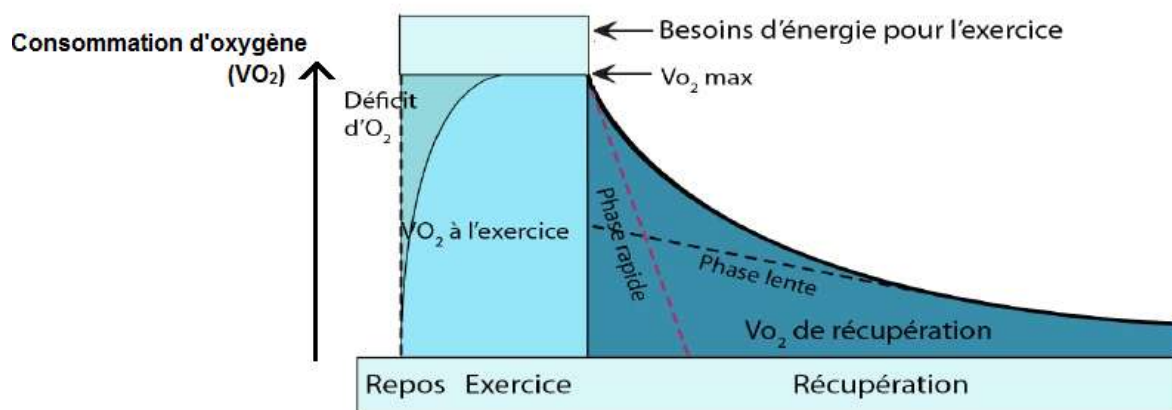


Figure 28 – Evolution de la consommation d'oxygène au cours d'un exercice d'intensité maximale. [34]

Lors d'un exercice d'intensité progressivement croissante, la consommation maximale d'oxygène augmente proportionnellement à l'intensité d'exercice.

On peut d'ailleurs approximativement estimer la consommation d'oxygène d'un sportif en multipliant sa vitesse de course par 3,5 (figure 29). Mais on peut également assez facilement la mesurer directement sur le sportif pendant qu'il réalise son test soit en laboratoire, soit sur piste avec un analyseur de gaz portatif.

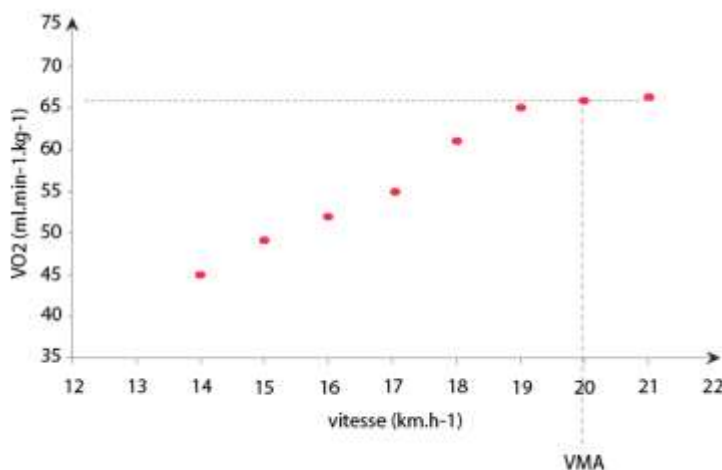


Figure 29 – Evolution de la consommation d'oxygène en fonction de l'intensité de l'exercice. [34]

Dans ces conditions on peut alors observer que VO_2 augmente progressivement et linéairement au fur et à mesure que le sportif augmente sa vitesse au fil des paliers du test, jusqu'à atteindre un plateau. Ce plateau correspond à la consommation maximale d'oxygène, connue sous la désignation VO_2 max.

Cette VO_2 max est propre à chaque individu. Plus la condition physique est importante, plus le niveau de VO_2 max atteint est élevé. Mais quel que soit le niveau du sportif, il ne pourra

pas dépasser ce maximum qui lui est propre. Tout simplement, ce niveau de consommation est limité par les capacités ventilatoires, de transport d'oxygène et du stock mitochondrial. Ces paramètres n'étant pas infinis, la consommation ne l'est pas non plus.

Chez la plupart des sportifs de niveau moyen, il est difficile d'observer ce plateau. On parle alors plus volontiers de VO_2 pic au lieu de VO_2 max. Cela est dû au fait que pour observer un plateau, il faut que le sportif ait une condition physique pour continuer un ou plusieurs paliers d'exercices alors qu'il a déjà atteint son niveau maximal de consommation d'oxygène. Autrement dit, il faut que le sportif soit capable de courir ces paliers principalement grâce à la filière anaérobie lactique, alors qu'une fatigue importante s'est installée à cause des paliers précédents. Seuls les sportifs d'un bon niveau de condition physique sont capables de cet exploit.

La vitesse correspondant au début du plateau de VO_2 max équivaut à la vitesse maximale aérobie (VMA). C'est la vitesse maximale qui peut être atteinte théoriquement grâce au métabolisme aérobie. Cela ne signifie pas que seule la filière aérobie sert à re-synthétiser l'ATP lorsque l'on effectue un exercice à cette vitesse. La filière anaérobie intervient également dans une proportion plus ou moins importante. La VMA ne correspond donc pas à l'intensité de transition entre la filière aérobie et anaérobie lactique qui se situe avant cette intensité. [34]

IV. Système digestif

A. Le tube digestif

L'intérieur du tube dans lequel circule le bol alimentaire est nommé la lumière. La paroi du tube digestif est assez semblable sur toute sa longueur. La couche superficielle, la *muqueuse*, contient des cellules dont les fonctions de sécrétion ou d'absorption varient selon l'organe, une couche plus profonde (*musculaire*) contient des muscles lisses dont les contractions assurent la propulsion du bol alimentaire. Un double système nerveux contrôle ces contractions :

- Un système dit *intrinsèque* dont les cellules nerveuses sont situées dans la paroi du tube digestif et sont stimulées par le bol alimentaire et probablement par les hormones produites par certaines cellules de la muqueuse ;

- Un système *extrinsèque* dirigé par le cerveau végétatif qui commande les muscles du tube digestif par les nerfs para-sympathiques (dits vagues ou pneumogastriques) et par les nerfs sympathiques (dits splanchniques).

Ces deux systèmes sont intimement liés dans leur fonction qui permet de réguler la motricité digestive, donc la vitesse de progression et d'absorption du bol alimentaire, selon les propriétés physiques (texture, température par exemple) et les propriétés chimiques (quantité de sucres, de graisses, de sel par exemple). [35]

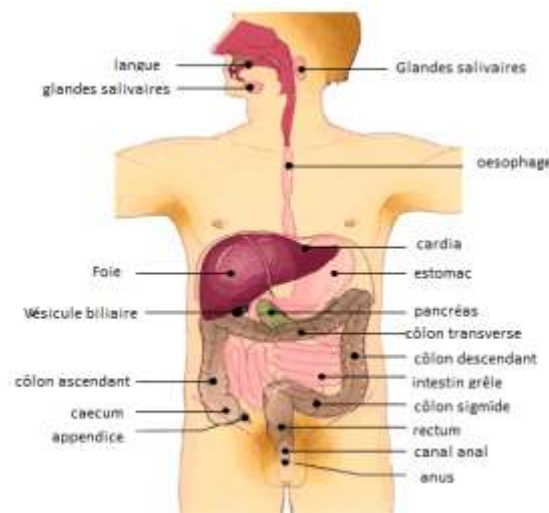


Figure 30 – Anatomie du tube digestif. [36]

B. De la bouche à l'œsophage

L'appareil digestif commence à la *bouche*, siège de la sécrétion de *salive* qui, même faible, existe de façon continue entre les repas. Il se poursuit par l'*œsophage* qui mesure 25 centimètres de hauteur et dont le rôle est de transporter activement les aliments vers l'estomac. Entre les repas, l'œsophage, contrairement à la trachée largement ouverte, ressemble à un tube aplati d'avant en arrière. Il est fermé en haut par son sphincter supérieur pour empêcher l'entrée de l'air et en bas par le sphincter inférieur appelé *cardia* interdisant le reflux des produits de sécrétions gastriques.

C. L'estomac

L'*estomac* qui le prolonge, est un réservoir limité par le *cardia* en amont et le *pylore* en aval. Il mesure environ 25 centimètres de hauteur 12 centimètres de largeur et 8 centimètres d'épaisseur. Il a une contenance de 1 litre à 1,5 litres.

Physiologiquement, il comprend deux parties :

- L'une verticale : le *fundus*, dont les cellules sécrètent le suc gastrique en particulier d'acide ;
- L'autre horizontale : l'*antre*, dont les cellules produisent des hormones, en particulier la gastrine, qui participe à la régulation de la sécrétion du fundus.

Au repos, l'estomac est parcouru par de très faibles contractions qui permettent de maintenir à l'intérieur de l'estomac, une pression supérieure à celle de l'œsophage pour que le cardia reste fermé et interdise toute remontée de liquide gastrique acide dans l'œsophage.

D. L'intestin grêle

Au-delà du pylore, l'intestin grêle débute par le *duodénum*. En forme de fer à cheval enserrant le pancréas, il reçoit les produits de sécrétion de celui-ci et la bile provenant du foie. Le reste de l'intestin grêle mesure environ 3 mètres, ses 2/5^{ème} proximaux constituent le *jéjunum*, et ses 3/5^{ème} distaux, l'*iléon*, sans qu'il existe de différence anatomique entre ces deux portions.

La fonction principale de l'intestin grêle est l'*absorption*. Sa surface est multipliée par 600 pour s'étendre sur quelques 300 m² par plusieurs sortes de reliefs :

- Des plis d'orientation circulaire mesurant 3 à 10 millimètres de haut (les *valvules conniventes*) ;
- Des reliefs en doigt de gant très fins de 0,4 à 1 millimètre de haut (les *villosités*) formés par la muqueuse dont la grande majorité des cellules (les *entérocytes*), sont dévolues à l'absorption ;
- Enfin des plis microscopiques du pôle apical de chaque entérocyte, fins poils de 1 micron de hauteur (les *microvillosités*).

La muqueuse du grêle est composée de quatre types de cellules :

- Les *entérocytes* déjà cités, cellules prédominantes qui outre leur rôle fondamental d'absorption ont également des fonctions de sécrétions d'enzymes qui terminent la digestion des glucides et des protides ;
- Les cellules *caliciformes* qui sécrètent du mucus probablement destiné à aider le glissement du bol alimentaire ;
- Les cellules de *Paneth* qui fabriquent des anticorps pour lutter contre les agents infectieux

- Des cellules *endocrines* responsables de la sécrétion de nombreuses hormones dont l'action encore imparfaitement connue régule la motricité gastro-intestinale, en particulier la vidange gastrique.

Entre les repas, l'intestin grêle est animé par des contractions périodiques qui démarrent environ au duodénum toutes les 90 minutes et qui progressent lentement vers l'iléon terminal. Il s'agit parfois d'ondes de brassage animant un court segment du grêle et dirigées de la paroi vers la lumière, parfois d'ondes péristaltiques très lentes se déplaçant depuis l'estomac vers le côlon.

E. Le gros intestin

Le *côlon*, dernière partie du tube digestif, forme un cadre dans la cavité abdominale. Il mesure entre 1,10 et 1,50 mètres. L'iléon terminal se déverse dans le *caecum*, situé dans la partie inférieure droite (fosse iliaque droite) de l'abdomen, il se poursuit par le côlon ascendant ou droit remontant vers le foie, puis par le côlon transverse orienté vers la gauche, puis par le côlon descendant ou gauche et enfin par le côlon sigmoïde occupant la fosse iliaque gauche et décrivant plusieurs boucles. Celui-ci se jette dans le *rectum*, grosse ampoule fusiforme placée en avant du sacrum et fermée en aval par l'*anus*.

La paroi du côlon n'est pas lisse, sa muqueuse n'est pas plissée par des villosités comme l'intestin grêle, mais par des plis musculaires délimitant une série de poches bombant vers l'extérieur (les haustrations). Entre les repas, le côlon est en permanence animé par des contractions qui n'ont pas la constance de celles observées dans l'intestin grêle. Il existe des contractions segmentaires de courte durée qui rétrécissent la lumière du côlon et assurent un freinage et un brassage de son contenu et des contractions propulsives de courte durée sur un court segment dans les deux sens assurant tantôt un brassage tantôt une propulsion. [37]

F. Le foie

Il est lisse, de consistance ferme, de coloration brun-rouge, constitué d'un parenchyme friable entouré d'une mince capsule fibreuse, la capsule de Glisson (*tunica fibrosa*). Il présente une extrême variabilité de volume, dimensions et poids. Son poids de 1 400 à 1 500 g chez le cadavre (environ 1/50e du poids corporel) est en fait plus élevé, de l'ordre de 2 300 à 2 500 g, chez le vivant, chez qui il est gorgé de sang. [38]

G. La vésicule biliaire

La vésicule biliaire est un petit réservoir en lien avec les voies biliaires au travers du canal cystique. Elle stocke et concentre une partie de la bile produite par le foie (environ 1L par jour) en attendant que celle-ci soit nécessaire à la digestion. Lors de l'ingestion de nourriture elle se contracte afin de libérer son contenu augmentant temporairement l'apport de bile dans le duodénum pour la digestion. La bile aide à la digestion en facilitant l'absorption des graisses. La bile est composée de mucus, de pigments biliaires, de sels biliaires, de cholestérol et de sels minéraux. [39]

H. Le pancréas

Le pancréas est une glande mixte composée de plusieurs populations cellulaires de morphologie et de fonction différentes.

Chez l'homme, le pancréas mesure de 15 à 25 cm de long et pèse environ 80 g. Il est situé profondément dans la région épigastrique entre le duodénum et la rate, en arrière de l'estomac. Il est connecté au duodénum au niveau de l'ampoule de Vater, dans laquelle se déverse le suc pancréatique par deux canaux excréteurs : le canal principal, dit canal de Wirsung, et le canal accessoire ou canal de Santorini. [40]

V. Physiologie de la digestion

A. Intervention de stimulus nerveux

Avant même l'ingestion d'aliments, le système digestif se prépare à leur arrivée. La vue, l'odorat, l'ouïe (bruit de la viande qui grille) ou tout simplement le conditionnement suffisent à initier l'activité digestive. En effet, ces stimuli déclenchent un influx qui est intégré dans le cortex cérébral et qui engendre une réponse vagale. Cette réponse entraîne une augmentation des sécrétions salivaires, gastriques et pancréatiques de même que la contraction de la vésicule biliaire et le relâchement du sphincter d'Oddi, tous deux nécessaires à l'écoulement de la bile.

B. De la bouche à l'œsophage

1. Mastication

La mastication est essentielle à la digestion adéquate des aliments. Elle sert à broyer et à séparer les aliments en petites particules. De plus, la mastication favorise le mélange de la salive aux aliments.

2. Composition et rôle de la salive

La salive est principalement composée de *mucus* (rôle de lubrification), de *lipase* linguale (digestion des lipides) ainsi que d'*amylase* salivaire (digestion de l'amidon). Le mucus lubrifie la cavité buccale afin de diminuer les dommages causés par le frottement de la nourriture sur l'épithélium. La salive contient également, mais en quantité moindre, des lysozymes et des immunoglobulines A (IgA) qui détruisent les bactéries à l'origine des caries et de la mauvaise haleine.

3. Rôles de la mastication et de la salive

La salive et la mastication remplissent plusieurs fonctions :

- La mastication réduit les aliments en petites particules.
- Elle aide à la formation d'un bol alimentaire pour la déglutition.
- La salive débute la digestion des lipides et de l'amidon.
- Elle facilite la gustation par la solubilisation des particules.
- Elle nettoie la bouche et assure une action antibactérienne.
- Elle neutralise le reflux gastrique acide dans l'œsophage par son pH alcalin.
- Les aliments ingérés produisent des stimuli pour les fonctions gastriques et duodénales. [41]

4. Déglutition

La déglutition est l'acte moteur par lequel le contenu buccal est transféré dans l'œsophage. Ce contenu buccal peut être solide ou liquide. [42]

5. L'œsophage

Le bol alimentaire arrive ainsi dans l'œsophage. Cette partie du tube digestif est constituée d'une couche musculaire circulaire et longitudinale. Les contractions de ces muscles sont responsables du péristaltisme qui permet au bol alimentaire de progresser vers

l'estomac même dans des conditions particulières (penché vers l'avant ou la tête à l'envers par exemple).

C. L'estomac

Une fois dans l'estomac, les aliments sont censés y rester grâce au sphincter œsophagien inférieur. Celui-ci ne s'ouvre normalement que pour laisser passer les aliments en provenance de l'œsophage. Malheureusement il arrive que ce système soit défaillant, ce qui se traduit par un passage du contenu de l'estomac vers le haut. Ce contenu étant très acide, il agresse les parois de l'œsophage. C'est ce qu'on appelle communément les « brûlures d'estomac », ou encore le reflux gastro-œsophagien (RGO).

1. Sécrétions gastriques

L'estomac est également constitué de muscles qui vont effectuer un deuxième travail mécanique, après celui de la bouche, en mélangeant les particules alimentaires aux sucs digestifs, sécrétés par l'estomac. Ces sucs digestifs ont chacun un rôle particulier.

La sécrétion gastrique est constituée :

- *D'acide chlorhydrique*

Il va permettre d'abaisser le pH dans l'estomac à une valeur située entre 1 et 3. Cette forte acidité va permettre de détruire un grand nombre de bactéries qui auraient pu se trouver dans les aliments, et également d'activer les enzymes qui dégradent les protéines.

- *De mucus :*

Pour se protéger de l'acide qui pourrait entraîner une auto-digestion de l'estomac, il y a production de mucus, une substance visqueuse protectrice. Il arrive que cette protection soit insuffisante dans certaines maladies. Lorsque l'estomac est endommagé par l'acide (ou par autre chose), on parle alors d'ulcère.

- *De gastrine*

Cette hormone joue un rôle de contrôle dans la production d'acide gastrique (un gros repas nécessitera plus d'acide qu'un petit repas).

- *De pepsinogène*

Cette enzyme est inactive dans un premier temps. Dès que le milieu devient acide elle se découpe, ce qui la rend active. Elle s'appelle alors la *pepsine* et devient capable de couper les protéines en peptides.

- *D'une lipase gastrique*

Cette enzyme possède une action limitée sur les lipides dans l'estomac mais agit tout de même sur les graisses alimentaires (triglycérides) qu'elle réduit en éléments basiques appelés acides gras.

- *Du facteur intrinsèque*

Cette protéine sera utilisée plus tard pour permettre l'absorption de la vitamine B12 dans l'intestin. Un manque ou une absence de facteur intrinsèque oblige à prendre un supplément de vitamine B12 pour toute la vie. [43]

2. Vidange gastrique

Le péristaltisme est l'activité caractéristique de la partie inférieure du corps gastrique. La coordination *antro-pyloro-duodénale* commande la vidange gastrique : l'arrivée d'une onde péristaltique dans l'antre pousse une partie du contenu gastrique ; l'ouverture du pylore et la relaxation duodénale permettent l'évacuation des liquides. Lorsque l'onde propulsive arrive dans l'antre terminale, le pylore se ferme et le duodénum se contracte, provoquant la rétropulsion du chyme dans la cavité gastrique et le broyage des particules alimentaires solides. Ainsi, les solides sont évacués hors de l'estomac après avoir été réduits en particules de l'ordre de 1 millimètre de diamètre en suspension dans le liquide gastrique. La vidange gastrique est donc un phénomène biphasique. Les liquides sont rapidement éliminés de l'estomac, le temps de $\frac{1}{2}$ vidange étant de 30 à 45 minutes. Pour les solides, la vidange initiale est lente, jusqu'à ce que les particules atteignent la taille critique de 1 millimètre ; la vitesse d'évacuation est ensuite identique à celle des liquides (figure 31).

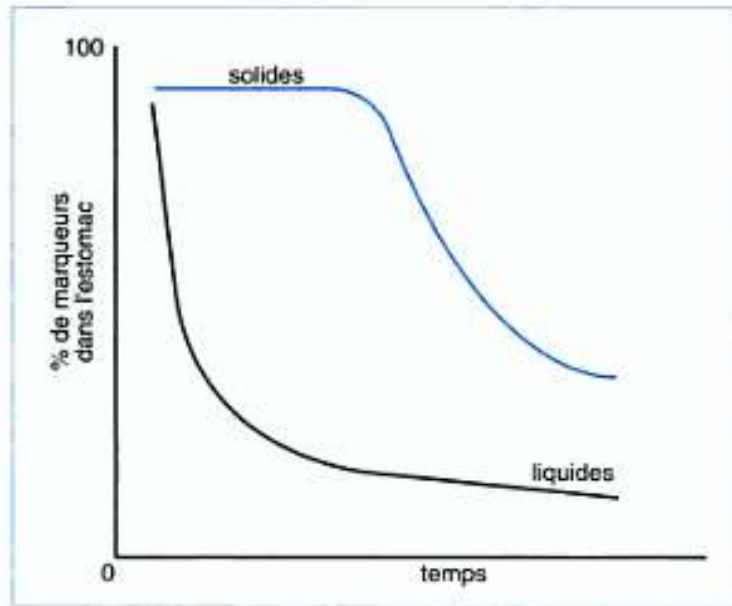


Figure 31 – Cinétique de la vidange gastrique des liquides et solides. [44]

Le *volume* et la *nature physique* des aliments (liquides ou solides) modifient l'activité motrice gastrique par l'intermédiaire de mécanorécepteurs, qui sont les points de départ de boucles réflexes véhiculées par des plexus nerveux intrinsèques ou par les nerfs vagues. La distension fundique (par l'arrivée d'aliments) provoque l'inhibition du péristaltisme de l'antrum distal : ce réflexe fundo-antral explique que la vidange gastrique débute avec un léger retard par rapport au début du repas.

La *composition chimique* des aliments modifie également la motricité gastrique, en stimulant les fibres chémosensibles afférentes et les cellules afférentes du vague ainsi que les cellules endocrines situées dans l'intestin grêle. La libération de cholécystokinine (CCK) est augmentée par la présence de lipides et d'acides aminés dans le duodénum. La CCK ralentit physiologiquement la vidange gastrique.

La *douleur*, le *stress* et les *émotions* ralentissent la vidange gastrique par un mécanisme central, dont les efférences sont véhiculées par le nerf vague. Des voies sympathiques adrénérgiques entraînent aussi une inhibition de la motricité antrale. [44]

D. L'intestin grêle dans la digestion

1. Sécrétion

La surface apicale des cellules épithéliales de la muqueuse est hérissée de microvillosités formant une *bordure en brosse*. La membrane cellulaire de celle-ci contient trois catégories différentes d'enzymes :

- L'*entérokinase* qui active une enzyme pancréatique, le trypsinogène.
- Des *disaccharidases* (*maltase*, *saccharase* et *lactase*) qui terminent la digestion des glucides en donnant des monosaccharides par hydrolyse des disaccharides restants.
- Des *aminopeptidases* qui scindent par hydrolyse les peptides en leurs acides aminés constitutifs achevant ainsi la digestion des protéines.

Il reste à étudier l'absorption des aliments. Jusqu'ici rien n'a été absorbé, ni eau, ni électrolytes ni nutriments.

2. Absorption

La totalité des produits de la digestion des glucides, des lipides et des protéines ainsi que des électrolytes, des vitamines et de l'eau sont absorbés dans l'intestin grêle. De ce fait, plus il y a d'aliments ingérés, plus il en sera digéré et absorbé comme ne le savent trop bien ceux qui essayent de réduire leur poids.

La plupart de l'absorption a lieu dans le duodénum et le jéjunum, non pas que l'iléon n'en soit pas capable mais parce qu'elle est pratiquement achevée quand le contenu intestinal y arrive. Le pouvoir d'absorption du grêle dispose d'une réserve fonctionnelle importante. En pratique, on peut supprimer près de 50 % de l'intestin grêle sans retentissement sur l'absorption à une exception près. Si l'on supprime la partie terminale de l'iléon, la vitamine B12 et les sels biliaires ne sont pas bien absorbés parce que les mécanismes de transport n'existent que là. Toutes les autres substances peuvent être absorbées par n'importe quelle partie de l'intestin grêle. [45]

E. Rôle du pancréas

Il est formé de groupes de cellules épithéliales glandulaires dont environ 1% sont regroupés en amas appelés « îlots de Langerhans »

Les cellules de ces îlots constituent la partie endocrine du pancréas. Elles synthétisent et sécrètent des hormones (l'insuline, le glucagon, la somatostatine et le polypeptide pancréatique).

Les autres cellules sont elles aussi regroupées en amas, appelés acini, et forment la partie exocrine du pancréas.

Elles sécrètent le *suc pancréatique* liquide contenant des enzymes digestives (environ 1,5 L/j).

- Composition du suc pancréatique:

Eau + bicarbonate de sodium qui donne un pH basique à la solution + *enzymes*.

- Enzymes du suc pancréatique :
 - *amylase pancréatique* (hydrolyse des glucides)
 - *trypsine, chymotrypsine, carboxypeptidase* (hydrolyse des protéines)
 - *lipase pancréatique* (hydrolyse des triglycérides)
 - *ribonucléase et désoxyribonucléase* (hydrolyse des acides nucléiques)

Ces enzymes sont d'abord sécrétées sous des formes inactives (cela évite qu'elles digèrent les molécules du pancréas) et sont transformées en leur forme active dans l'intestin grêle. [46]

F. Rôle des acides biliaires

Les acides biliaires jouent un rôle capital dans la digestion et l'absorption des lipides. C'est sous leur action que les lipides alimentaires sont solubilisés en micelles, agrégats multimoléculaires formés autour des acides biliaires du fait de leur propriété très particulière : les acides biliaires sont en effet des molécules amphipathes, c'est-à-dire qu'elles sont à la fois hydrophobes et hydrophiles. Ceux-ci vont donc permettre la solubilisation des lipides de l'alimentation en les mettant en contact avec leur pôle hydrophobe. Ce complexe formé des acides biliaires et des lipides de l'alimentation situés au cœur du complexe constitue la micelle. C'est dans la micelle que la lipase pancréatique pourra digérer les triglycérides à l'aide de la colipase. [47]

G. Rôle du côlon

1. Absorption

Le côlon absorbe l'eau des résidus alimentaires. La quantité absorbée est proportionnelle au temps de séjour des résidus dans le côlon. Les ions sodium sont absorbés activement avec le chlore, tandis que l'eau passe passivement vers le sang.

Le côlon est capable d'absorber de petites quantités de vitamines (K et B) produites par la flore commensale. Cette quantité de vitamines est probablement insignifiante en cas de nutrition normale.

2. Synthèse

Le gros intestin est colonisé par de nombreuses bactéries commensales : elles se nourrissent des résidus alimentaires du rectum et en échange synthétisent de la vitamine K et quelques vitamines du groupe B (thiamine, riboflavine, folate et B12). Parmi ces bactéries on trouve : *Escherichia coli*, *Enterobacter aerogenes*, *Streptococcus faecalis* et *Clostridium perfringens*. Ces bactéries sont commensales dans l'intestin, mais peuvent devenir pathogènes si elles se localisent dans d'autres lieux, par exemple *E.Coli* dans la vessie ou *C. perfringens* dans une plaie.

Les bactéries intestinales sont aussi responsables de la fermentation des résidus alimentaires non digérés, ce qui produit des gaz ou flatulences. Ces gaz comprennent le méthane, le dioxyde de carbone, l'hydrogène sulfureux et l'hydrogène ; certains contribuent aux odeurs des selles. La quantité de gaz produite (habituellement entre 450 et 700 mL par jour) dépend du type d'alimentation : les aliments qui augmentent la production de gaz sont les haricots, les lentilles, les choux, les choux-fleurs et les oignons.

3. Stockage

La plupart des résidus alimentaires traversent le gros intestin en 12 à 72 heures, mais le temps de transit dépend de nombreux facteurs parmi lesquels les fibres indigestes du régime alimentaire. L'intestin est capable de stocker de grandes quantités de déchets qui peuvent parvenir au rectum après une semaine ou plus.

4. Elimination

Le côlon propulse son contenu vers le rectum par des mouvements péristaltiques puissants, appelés *mouvements de masse*, qui sont liés au réflexe gastro-colique déclenché par la présence de nourriture dans l'estomac. [48]

Les déchets vont ensuite s'accumuler dans le rectum, l'extrémité finale du gros intestin, jusqu'à ce que le cerveau ordonne au corps de s'en débarrasser. [49]

La physiologie du sportif est donc complexe, celle-ci consomme de l'énergie et les besoins augmentent avec un exercice physique. L'étude de la nutrition générale est donc nécessaire pour pouvoir conseiller une alimentation équilibrée et adaptée aux sportifs d'endurance.

PARTIE II : DEPENSES ENERGETIQUES ET **NUTRITION**

I. Dépenses énergétiques

A. Généralités

L'homme est incapable de fabriquer de l'énergie. Pour couvrir ses besoins, il la puise dans le milieu extérieur ou dans ses réserves à partir des liaisons chimiques des nutriments et la transforme en une autre énergie chimique utilisable, l'adénosine triphosphate (ATP). L'homme en consomme également qu'il restitue au milieu extérieur de façon immédiate ou retardée, sous une forme identique et chimique (urée, créatinine par exemple) ou différente (mécanique et thermique). En l'absence de variation du poids ou de la composition corporelle, les apports énergétiques sont égaux aux dépenses.

Les trois nutriments sources d'énergie sont les glucides, les lipides et les protéines.

La dépense énergétique des 24 heures est la somme de trois grands postes (métabolisme de base et dépense énergétique de repos, activité physique, effet thermique des aliments). L'ensemble de ces dépenses énergétiques constitue la dépense énergétique totale.

B. Métabolisme de base et dépense énergétique de repos

Le métabolisme de base correspond à la dépense énergétique minimale pour le fonctionnement et l'entretien de l'organisme, dans des conditions très standardisées (à jeun, au repos, à température neutre). Le métabolisme de base est souvent confondu avec la dépense énergétique de repos. La dépense énergétique pendant le sommeil est inférieure d'environ 5 % par rapport au métabolisme de repos. Le métabolisme de base correspond à l'énergie nécessaire pour le fonctionnement des pompes ioniques, des turnover de substrats, des cycles futiles et pour le maintien de la température. Le métabolisme de base représente environ 60 % de la dépense énergétique des 24 h.

C. Energie dépensée pour l'activité physique

Elle correspond à toute forme de dépense énergétique qui s'ajoute au métabolisme de base, à cause du mouvement. Ceci concerne tout aussi bien les activités de la vie quotidienne que les exercices physiques plus intenses, qu'ils soient sportifs ou non. Ce poste de dépense

énergétique est le plus variable d'un individu à l'autre, et représente entre 15 % et 30 % de la dépense énergétique totale.

D. Effet thermique des aliments

Afin que l'énergie chimique contenue dans les aliments puisse être convertie en énergie utilisable, les aliments doivent être digérés, c'est-à-dire transformés en substances plus simples, puis être stockés par exemple au niveau du foie et du muscle sous forme de glycogène, ou au niveau du tissu adipeux sous forme de triglycérides. L'ensemble de ces processus coûte de l'énergie.

Ce coût varie avec les voies biochimiques empruntées. On estime que ce coût représente environ 5 % à 10 % de la valeur calorique ingérée sous forme de glucides, 20 % à 30 % pour les protéines, et moins de 5 % pour les lipides.

L'effet thermique des aliments, ne représente qu'une faible portion (environ 10 %) de la dépense énergétique totale.

E. Autres

À ces trois postes principaux de dépense énergétique, il faut ajouter des dépenses inhabituelles qui, dans certaines circonstances, peuvent constituer un coût important. Il en est ainsi de la croissance, dont le coût est très faible. Il en est de même du coût nécessaire aux phénomènes de réparation et de cicatrisation qui peut s'avérer très important par exemple dans le cas des brûlures étendues. L'ensemble des réactions de défense contre l'infection et les réactions inflammatoires créent une dépense énergétique qu'il faudra savoir prendre en compte pour un patient. [50]

II. Apports en énergie

A. Teneur énergétique des aliments

La teneur en énergie des aliments est calculée grâce à des coefficients de conversion : 4 kcal/g pour les glucides et les protéines, 9 kcal/g pour les lipides et 7 kcal/g d'alcool. Pour éviter l'erreur due à la faible valeur énergétique des fibres, décomptées généralement dans les glucides, on leur attribue une valeur énergétique moyenne de 2 kcal/g, valable en réalité seulement pour les fibres solubles, en partie digestibles, telles que les pectines, l'inuline ou les fructo-oligosaccharides à chaîne plus ou moins longue.

B. Bilan énergétique

Le bilan énergétique est à l'équilibre lorsque les apports en énergie sont équivalents aux dépenses. Ces dépenses, qui peuvent varier d'un individu à l'autre et d'un moment à l'autre, dépendent de plusieurs facteurs, dont : en premier lieu l'activité physique, la thermorégulation, l'état hormonal, thyroïdien notamment, le sexe, l'âge (la baisse de la dépense énergétique peut totaliser 30 % entre 20 et 75 ans, dépassant de beaucoup la simple diminution de la masse musculaire), la composition corporelle (un excès de masse grasse entraînant une baisse des dépenses énergétiques par kilo de poids corporel) et le métabolisme de base, exprimant les dépenses incompressibles de tout organisme vivant : fonctionnement cardiaque et respiratoire, renouvellement des structures cellulaires, maintien du tonus musculaire, dépenses du système cérébral, dont il est admis qu'il représente environ 30 % du total du corps, échanges ioniques nécessaires au fonctionnement des cellules.

L'évolution des modes de vie, qui privilégie depuis quelques décennies l'activité professionnelle d'intérieur, moins soumise au froid, et les activités sédentaires plutôt que musculaires, la mécanisation du travail, le chauffage souvent excessif des bureaux et lieux d'habitation, a entraîné une baisse certaine des dépenses et donc des besoins en énergie.

Lorsque les apports en énergie ne sont pas équivalents aux dépenses, la masse corporelle traduit selon le cas l'insuffisance ou l'excès d'énergie, mesurés par l'indice de corpulence ou de masse corporelle (IMC), appelé aussi indice de Quetelet, ou BMI (body mass index des Anglo-Saxons), qui se calcule en divisant le poids en kilogrammes de l'individu par sa taille en mètres portée au carré (P/T^2).

C. L'indice de masse corporelle (IMC)

Cet indice définit soit la sous-nutrition, sévère (≤ 16) ou légère (16 à 18), soit la normalité (18 à 22), soit le surpoids (25 à 30) et l'obésité, moyenne (30 à 40) ou forte (≥ 40). Ces seuils ne sont valables que chez l'adulte. Chez l'enfant, en raison de la variation physiologique de la composition corporelle avec la croissance, il est nécessaire de se référer à des courbes établies pour chaque sexe de 0 à 21 ans, présentes dans les carnets de santé depuis 1995. Elles ont été établies à partir des données françaises de l'étude longitudinale internationale de la croissance et ont donc valeur de référence en France.

D. Calcul des dépenses énergétiques

Il est possible de calculer les dépenses énergétiques (DE), selon la durée et l'intensité des activités au cours de la journée, selon un barème fonction du sexe, de l'âge, du métabolisme de base (MB) ou de la dépense énergétique de repos (DER). Les facteurs de prédisposition à la prise excessive de poids, pour un apport équivalent en énergie, toutes choses égales par ailleurs, tiennent à la prédisposition génétique propre à chaque individu et signent l'inégalité des individus devant l'effet de l'alimentation.

Mais les facteurs alimentaires susceptibles de favoriser la prise de poids sont modulables. Il s'agit des aliments riches en graisses, vecteurs d'énergie de densité calorique élevée car très pauvres en eau (tels le beurre, la margarine ou les huiles), de prix très (trop) accessible et de palatabilité forte, surtout accompagnés de produits sucrés, comme dans les pâtisseries ou les crèmes glacées.

Interviennent également les boissons alcoolisées (7 kcal/g d'alcool), attractives et euphorisantes, ou sucrées et/ou gazeuses, faussement désaltérantes et flatteuses au goût, surtout chez les enfants et les adolescents. Enfin, les « produits de grignotage » jouent un rôle clé : sapides parce que souvent salés et riches en graisses ou en sucre, mais pauvres dans les autres nutriments, ce sont par exemple les biscuits ou graines pour apéritif, les chips, popcorn, ou friandises diverses.

Les apports conseillés concernant l'énergie se superposent aux besoins, pour la simple raison que l'équilibre de poids est obtenu lorsque les apports en énergie sont équivalents aux dépenses, et qu'il ne convient donc pas de prévoir une marge supplémentaire de sécurité pour une population.

Ainsi, les apports conseillés doivent être considérés comme des valeurs moyennes et pour une catégorie bien définie d'individus quant à l'âge, le sexe et les activités principales. Les dépenses en activité physique dépendent directement du poids de l'individu et peuvent être exprimées en multiples du métabolisme de base (MB) ou de la dépense énergétique de repos (DER), et sont, de ce fait, comparables entre individus : ce mode de calcul a été adopté par l'Organisation mondiale de la santé (OMS).

1. Calcul du métabolisme de base

L'estimation du MB peut être faite en fonction du poids et de la taille, du sexe et de l'âge, pour des sujets en bonne santé et d'âge inférieur à 75 ans, selon les formules suivantes :

- femmes : $MB = 0,963 \times P^{0,48} \times T^{0,50} \times A^{-0,13}$;

- hommes : $MB = 1,083 \times P^{0,48} \times T^{0,50} \times A^{-0,13}$;

avec p = poids en kg ; T = taille en m ; A = âge en années.

2. Calcul de la dépense énergétique totale journalière

La dépense énergétique totale par jour (DEJ) se calcule à partir du MB, multiplié par le niveau d'activité physique :

$$DEJ = MB \times \text{Niveau d'activité physique}$$

L'estimation du niveau d'activité physique, fonction du type d'activité quotidienne, suit une échelle de valeurs données de façon simplifiée comme suit :

- 1,2/1,3 : lit ou fauteuil ;
- 1,4/1,5 : travail assis, déplacements et activités de loisirs faibles ;
- 1,6/1,7 : travail assis, déplacements faibles et activités de loisirs peu fatigantes ;
- 1,8/1,9 : travail debout ;
- 2,2/2,4 : travail ou activités physiques de loisirs intenses ;
- + 0,3 : activités physiques intenses de sport ou de loisirs (de 30 à 60 minutes, quatre ou cinq fois par semaine).

3. Ajustement en fonction de l'IMC

Il faut tenir compte du fait que la corpulence correspondant au surpoids, et surtout à l'obésité, traduit une composition corporelle différente de la normalité. La masse grasse qui s'accroît parallèlement à l'IMC représente une dépense métabolique inférieure à celle de la masse maigre, alors qu'elle est considérée comme équivalente. Chez l'adulte de poids normal, la masse grasse ne représente que 4 % du MB.

En conséquence, il faut diminuer de 1 % la DEJ calculée par point d'IMC au-dessus de 22 et l'augmenter symétriquement en dessous de 22.

Cette notion n'est pas transposable à la dépense due à l'effort (considérée indépendamment du temps de sa réalisation), fonction quant à elle du poids total de l'individu. Il existe une importante variabilité entre individus de même taille, de même sexe et

de même âge, en ce qui concerne tant les dépenses métaboliques de base, que l'aptitude à l'activité physique, l'énergie nécessaire à la constitution d'une même quantité de graisses de réserves et la régulation de l'arrêt de la prise alimentaire.

Ces éléments, en grande partie d'origine génétique, issus de milliers d'années d'adaptation à la pénurie et qui ont été des facteurs de survie pour la plupart des humains, sont devenus, depuis que les sociétés de type occidental connaissent l'abondance et peuvent se permettre la sédentarité, des facteurs de pléthore et de surpoids, et des pathologies ainsi induites.

On peut toutefois donner pour base d'évaluation des besoins (et donc des dépenses) en énergie, pour une vie de type plutôt sédentaire, les valeurs de 2 200 kcal/j pour les hommes et 1 800 kcal/j pour les femmes, une baisse de 200 kcal/j étant à prévoir à l'intérieur de ces valeurs entre les tranches d'âge de 20 à 40 ans et de 40 à 60 ans. [51]

III. Les nutriments

Les nutriments glucidiques, lipidiques et protéiques fournissent l'énergie nécessaire au maintien des fonctions de l'organisme au repos ou durant un exercice physique. Outre leur rôle de « carburant » biologique, ces nutriments, appelés macronutriments, préservent l'intégrité structurale et fonctionnelle de l'organisme. [52]

A. Glucides

1. Généralités

L'adulte ingère 300 à 400 g de glucides (hydrates de carbone) par jour, ce qui représente 55 à 60 % de sa ration énergétique quotidienne. 50 à 60 % de cette énergie est apportée sous forme d'amidon, polymère de haut poids moléculaire de glucose, 30 à 40 % sous forme de saccharose, et le reste sous forme de lactose. Les fibres alimentaires végétales n'étant que peu disponibles (digérées, absorbées) pour le métabolisme intermédiaire n'apportent que quelques dizaines de kilocalories par jour. [53]

2. Biochimie

On peut diviser les glucides en trois grands groupes:

- Les monosaccharides ;
- Les disaccharides ;
- Les polysaccharides.

a) Les monosaccharides

Les monosaccharides sont des molécules formées de carbones (C), hydrogènes (H) et d'oxygène (O). La plupart ont pour formule générale $C_nH_{2n}O_n$.

La plupart des monosaccharides que l'on retrouve chez les êtres vivants ont 5 ou 6 carbones :

- Monosaccharides à 5 carbones ($C_5H_{10}O_5$) = *pentoses*
- Monosaccharides à 6 carbones ($C_6H_{12}O_6$) = *hexoses*.

Les plus importants pentoses sont :

- Le ribose
- Le désoxyribose.

On retrouve la plupart des pentoses dans les acides nucléiques (comme l'ADN par exemple).

Les monosaccharides les plus abondants sont des hexoses.

Les plus connus sont:

- le glucose (ou dextrose)
- le fructose (ou lévulose)
- le galactose.

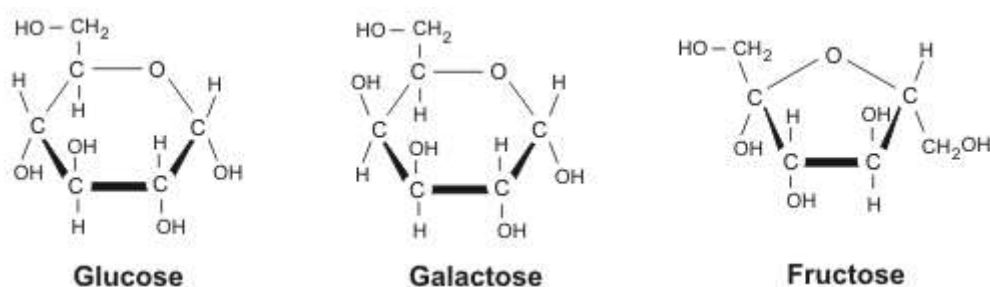


Figure 32 - Structure chimique du glucose, galactose et fructose. [54]

Le glucose et le galactose ont un goût beaucoup moins sucré que le fructose. Beaucoup d'aliments sucrés produits par l'industrie contiennent du sucre inverti. Il s'agit d'un mélange de glucose et de fructose. Il s'agit d'un sirop fait d'un mélange de glucose et de fructose obtenu par l'hydrolyse du saccharose (séparation avec addition d'une molécule d'eau). Le sucre inverti a l'avantage de ne pas cristalliser comme le fait le saccharose. [54]

b) Les disaccharides

Un disaccharide est un glucide formé de l'union chimique de deux monosaccharides.

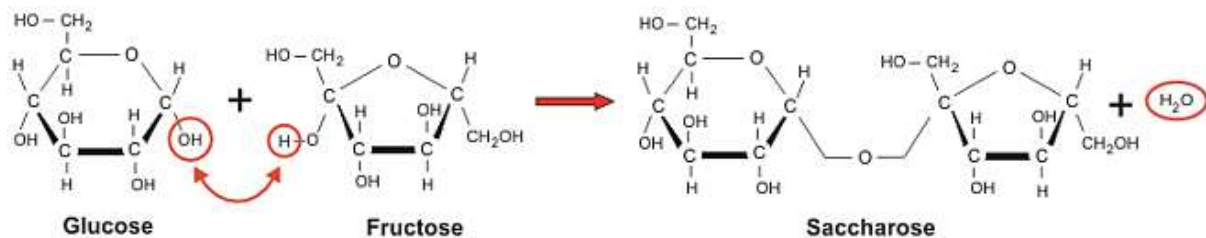


Figure 33 – Synthèse du saccharose. [55]

Le saccharose se forme par l'union d'un glucose à un fructose. Les deux sucres demeurent liés par l'intermédiaire d'un O. Ce type de réaction où deux molécules simples s'unissent avec dégagement d'une molécule d'eau est appelé réaction de condensation (ou synthèse par déshydratation).

La réaction inverse est appelée hydrolyse.

Les disaccharides les plus courants sont:

- Le saccharose = glucose-fructose ;
- Le lactose = glucose-galactose ;
- Le maltose = glucose-glucose.

Le saccharose est le mieux connu des glucides. La plupart des produits au goût sucré que nous connaissons en contiennent (comme le sucre de canne).

Le lactose est le sucre le plus abondant dans le lait.

Le maltose est abondant dans le malt (le malt, c'est le nom que l'on donne aux grains d'orge germés utilisés pour faire de la bière). On en trouve aussi dans de nombreux végétaux. [55]

c) Les polysaccharides

La plupart des polysaccharides sont des polymères de glucose.

Les trois polysaccharides les plus connus sont :

- L'amidon
- Le glycogène
- La cellulose.

✓ L'amidon

L'amidon est formé de deux types de polymères (*grosse molécule formée de l'union les unes aux autres de nombreuses petites molécules identiques ou semblables.*) de glucose : l'amylose et l'amylopectine. L'amylose est formée de chaînes linéaires de glucoses (les

glucoses sont liés les uns aux autres comme les maillons d'une chaîne : liaisons α 1-4) alors que l'amylopectine est formée de chaînes ramifiées (embranchements comme les branches d'un buisson : liaisons α 1-6). Chaque molécule peut contenir de 100 à 20 000 glucoses.

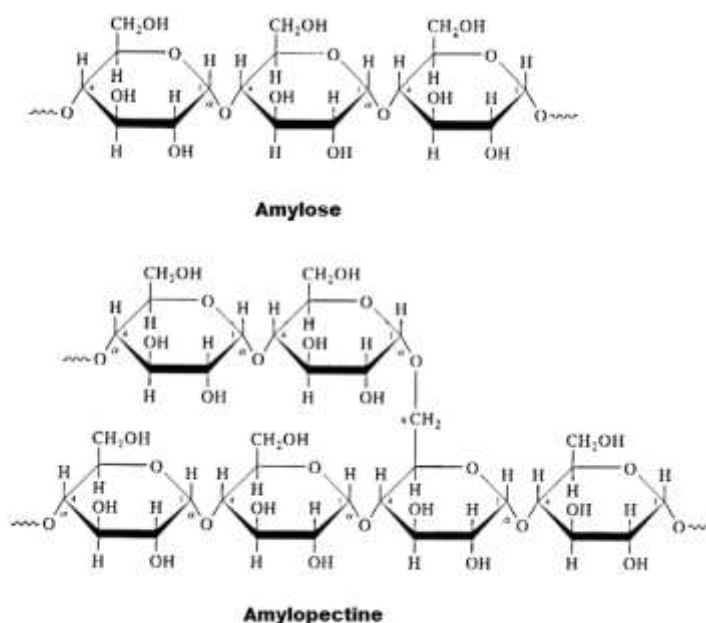


Figure 34 – Représentation biochimique de l'amylose et de l'amylopectine. [56]

L'amidon est le sucre de réserve des plantes. C'est à dire que c'est surtout sous cette forme que les plantes mettent en réserve leurs surplus de glucose. On retrouve de l'amidon surtout dans les racines, les graines et les fruits. L'amidon est particulièrement abondant dans les céréales (riz, blé, maïs, etc.) et les tubercules (pommes de terre).

✓ Le glycogène

Le glycogène est un polymère de glucose semblable à l'amylopectine, présent dans les muscles (la viande) et le foie des animaux. On qualifie le glycogène de sucre de réserve des animaux. C'est en effet une façon pratique, pour l'organisme, de mettre en réserve des surplus de glucose.

Les cellules (foie et muscles surtout) transforment alors ces surplus de glucose en molécules de glycogène ce qui contribue à faire baisser la glycémie. L'organisme est capable de stocker jusqu'à 600 g de glycogène.

✓ La cellulose

Tout comme l'amidon et le glycogène, la cellulose est un polymère de glucose. Elle est formée de longues chaînes linéaires de molécules de glucose liées les unes aux autres (liaisons β 1-4).

Ces liaisons bêta 1-4 ne peuvent pas être brisées par les sucs digestifs de la plupart des animaux. Résultat, on ne peut pas digérer la cellulose. [57]

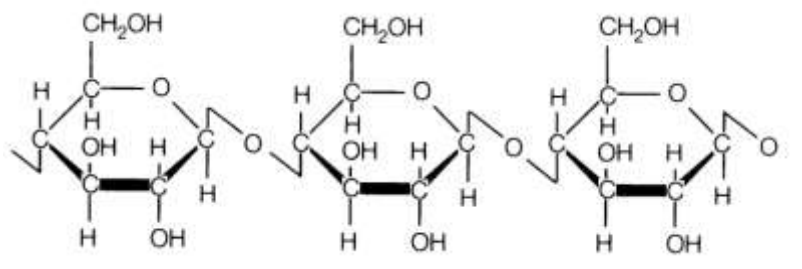


Figure 35 – Représentation biochimique de la cellulose. [58]

3. Rôles des glucides

a) Rôle énergétique

La fonction essentielle des glucides est de fournir de l'énergie à partir de l'alimentation surtout végétale : 1 g de glucide = 4 kcal.

b) Rôle de structure

Les hétérosides issus de molécules complexes contenant des éléments non glucidiques (protéines, phosphores...) associées à des éléments glucidiques, sont présents dans divers tissus conjonctifs comme le cartilage, certains récepteurs membranaires, le mucus... [59]

4. Où trouve-t-on les glucides ?

Les glucides, en particulier complexes, constituent une forme de stockage de l'énergie pour les animaux ou les végétaux. Ils sont, par conséquent, naturellement présents dans la plupart des aliments. La quantité et le type de glucides retrouvés sont, toutefois, extrêmement variables selon les aliments.

Les produits contenant, naturellement, une forte proportion de glucides simples sont les fruits, le lait, le miel et tout autre produit naturellement sucré.

Les glucides complexes digestibles sont naturellement présents dans les féculents, c'est-à-dire, les céréales, le pain, les légumineuses (haricots secs, pois, lentilles ...), ainsi que les

pommes de terre et leurs dérivés. Les fibres alimentaires, glucides complexes non digestibles, proviennent, quasi intégralement, des produits d'origine végétale, fruits, légumes et produits céréaliers complets.

La fabrication et la transformation d'aliments par l'industrie alimentaire peut, également, être à l'origine d'ajout de glucides aux produits fabriqués. Ces glucides ajoutés peuvent avoir pour but d'augmenter le goût sucré des aliments mais ils servent également à améliorer l'aspect, la texture ou la durée de conservation des produits préparés. Les produits industriels les plus contributeurs en apports de glucides ajoutés sont les jus de fruits et les sodas, les confiseries, les desserts lactés, les glaces, les céréales de petit déjeuner ou les biscuits. [60]

5. Besoins en glucides

Les glucides doivent absolument fournir 50 à 55 % des calories totales d'une journée. Dans ce quota de glucides, ceux provenant du sucre, y compris celui contenu dans les produits sucrés et les boissons sucrées, ne doivent pas dépasser 10 %, soit 5 % des calories totales. [61]

6. Apparté sur les édulcorants et les polyols

a) Edulcorants intenses

Un édulcorant est une molécule véhiculant une saveur sucrée. Toutefois dans le langage courant, le terme édulcorant est utilisé pour désigner des molécules à très fort pouvoir sucrant (aspartame, acésulfam, saccharine, cyclamate). Ces molécules sont désignées par le terme générique d'édulcorants intenses. Le pouvoir sucrant de ces derniers est beaucoup plus fort que celui du saccharose (ou sucre de table), et ne fournissent presque pas de calories. De très faibles doses sont donc suffisantes pour donner un goût sucré aux aliments ou aux boissons, en évitant d'ajouter des calories.

b) Polyols

Les polyols sont des édulcorants sans sucres. Ce sont des glucides mais pas des sucres. Ils sont utilisés volume pour volume en quantité identique à celle du sucre, contrairement aux édulcorants intenses comme l'acésulfame de potassium, l'aspartame, la saccharine et le sucralose qui sont utilisés en très petite quantité.

Ceux qui sont employés dans les denrées alimentaires au sein de l'Union Européenne (UE) sont le maltitol et le sirop de maltitol (E965), l'isomalt (E953), le lactitol (E966), le mannitol (E421), le sorbitol (E420) et le xylitol (E967). Un nouveau polyol, l'erythritol (E968), est maintenant autorisé.

Les polyols sont utilisés dans une large gamme de produits, dont notamment les chewing-gums, la confiserie, les crèmes glacées, la biscuiterie, et les préparations de fruits. Ils sont aussi utilisés dans les dentifrices, les bains de bouche, et les médicaments tels que les sirops pour la toux ou les pastilles pour la gorge.

Les polyols apportent moins de calories au gramme que les sucres et ne provoquent pas d'augmentation rapide du taux de glucose dans le sang.

Du fait de leur bon goût, ils permettent d'améliorer l'aspect santé du régime alimentaire sans interdire le plaisir de manger des aliments sucrés. Par ailleurs, les polyols sont faiblement transformés en acides par les bactéries de la cavité buccale et ne favorisent donc pas la carie dentaire.

Pour une grande majorité de consommateurs, ces édulcorants ne posent pas de problème. Chez certaines personnes, une consommation excessive peut conduire à des symptômes gastro-intestinaux tels que de la flatulence ou des effets laxatifs, tout à fait similaires aux réactions que provoque la consommation de haricots secs ou de certains aliments riches en fibres. De tels symptômes dépendent de la sensibilité individuelle ainsi que de la nature des autres aliments consommés en même temps. [62]

7. Les fibres

Les fibres végétales sont des structures glucidiques, sauf la lignine qui est un polymère aromatique de phénylpropane.

Elles sont non digestibles, c'est-à-dire non altérées par les enzymes intestinales et parviennent très peu dégradées dans l'iléon et le côlon où elles sont pour certaines d'entre-elles, les solubles transformées par les bactéries lors de la fermentation colique.

Elles n'ont pas de rôle énergétique.

On distingue deux types de fibres dont les rôles physiologiques sont différents : les fibres solubles et insolubles.

a) Les fibres solubles

Elles présentent trois propriétés principales :

- *Hydrosolubles*

Leur ingestion entraîne la formation d'un gel visqueux qui modifie le métabolisme des glucides et des lipides en diminuant leur biodisponibilité. En les enserrant dans un magma, l'action des enzymes digestives s'en trouve réduite.

- *Fermentescibles*

Une fois dans le côlon, elles produisent, par l'action des bactéries coliques, des acides gras volatiles à chaîne courte. Ceux-ci ont des vertus :

- Protectrices contre certains cancers, notamment coliques ;
- Immunitaires par un renforcement du système immunitaire intestinal ;
- Métaboliques.

Un apport élevé en fibres solubles peut induire une diminution du taux de LDL-cholestérol sanguin (jusqu'à 10 à 20 % de sa valeur initiale). Encore faut-il, pour bénéficier de ces vertus, consommer des fibres solubles en quantité suffisante et sur une longue durée.

- *Satiétogènes*

Elles réduisent la vitesse de vidange gastrique et donnent une sensation de plénitude gastrique. Leur consommation permet le contrôle des prises alimentaires.

b) Fibres insolubles

Elles aussi présentent trois propriétés principales :

- *Régulatrices du transit intestinal*

Elles accélèrent le transit en stimulant le péristaltisme et la force de contraction colique. Elles participent ainsi à la réduction de la symptomatologie des différents troubles fonctionnels intestinaux.

- « *Détoxifiantes* »

Associées aux fibres solubles qui diluent les différents polluants toxiques absorbés, elles assurent l'augmentation de la vitesse du transit, un moindre contact de ceux-ci avec les muqueuses digestives, et ainsi une moindre absorption.

- *Métaboliques*

L'activation du transit permet aussi une diminution de l'assimilation des glucides et des lipides, et notamment la recapture du cholestérol et des acides biliaires.

Tous les végétaux contiennent des fibres solubles et insolubles, mais dans des proportions variables. La répartition doit être de 1/3 des apports en fibres solubles (essentiellement la pulpe des fruits et légumes frais) et 2/3 en fibres insolubles (l'enveloppe des fruits et légumes et des graines : haricots, petits pois, le son des céréales...)

Les besoins en fibres sont évalués à 30 g à 40 g par jour. La consommation quotidienne, comprise entre 15 et 19 g, dans les pays occidentaux est insuffisante. [63]

8. L'index glycémique

a) Définition

L'index glycémique (IG) a été proposé comme base physiologique pour classer les aliments contenant des hydrates de carbone. Selon ce système, les différents aliments sont assignés à des valeurs en fonction de leur réponse glycémique.

L'index glycémique est calculé par le rapport de l'aire sous la courbe de la glycémie après la consommation de 50 g d'hydrate de carbone d'un aliment-test et l'aire sous la courbe après consommation d'une quantité semblable d'un aliment-témoin, glucose ou pain blanc pendant deux heures. Il s'exprime en pourcentage de la norme.

L'IG étant mesuré individuellement pour chaque aliment, la capacité de prévoir les réponses glycémiques des repas variés a dû être discutée à partir des IG des aliments constitutifs. Ainsi, le concept de charge glycémique (CG) a été proposé comme méthode pour caractériser l'effet glycémique des repas. La CG est calculée par le produit de l'IG et la quantité d'hydrate de carbone apportée dans le repas ($CG = IG \times \text{quantité d'hydrate de carbone en grammes}$).

La classification résultante de l'index glycémique des aliments fournit donc une classification physiologique des aliments (Tableau 1).

Index glycémique	Aliments
110	Maltose (bière)
100	Glucose
95	Pommes cuites au four ou frites – Galettes de riz soufflé
90	Purée de pomme de terre – Riz instantané – Miel
85	Carottes cuites – Corn-flakes, Pop-corn – Farine T45 (pain très blanc baguette) – Gâteau de riz
80	Fèves – Pain suédois – Crackers – Pain d'épices
75	Potiron, Citrouille – Farine T55 (baguette) – Weetabix, Chocopops – Pastèque
70	Croissant, petit pain au lait – Gnocchi – Pain de campagne (farine blanche T65) – Céréales sucrées – Barres chocolatées (type Mars) – Pomme de terre bouillie (sans peau) – Riz blanc précuit incollable – Maïs – Navets – Maïzena, Tacos – Soda sucré, Coca, Pepsi classiques – Sucre de canne ou de betterave (saccharose)
65	Pommes de terre cuites à l'eau dans leur peau – Semoule raffinée (couscous, taboulé) – Betterave – Barre de céréales – Banane, melon, ananas – Raisins secs – Confiture classique 50 % sucre – Fruit au sirop – Jus d'orange industriel
60	Riz long cuit en 15 min – Cookies – Papaye – Chips
55	Biscuit sec type « Petit beurre » – Biscuits sablés – Muesli non toasté, Spécial K – Kiwi
50	Pain complet (farine T150) – Sarrasin, Flocons d'avoine – Chocolat – Muffin aux pommes – Riz brun complet – Petits pois en conserve – Patate douce, carottes crues – Mangue – Pâtes blanches bien cuites – Sorbets – Riz blancs riches en Amylose (Basmati)
45	Muesli toasté – Pain au son – Boulgour entier – Grains de blé dur entier précuit (Ebly) – Petits pois frais – Raisin
40	Jus d'orange frais – Jus de pomme nature – Pain de seigle complet – Pâtes complètes (farine T150) – Haricots rouges
35	Pain intégral – Pâtes (spaghetti) cuites <i>al dente</i> – Vermicelles chinois – Bâtonnet de poisson – Pois secs – Yogourt – Orange, pomme, poire, abricots secs, figues
30	Pâtes intégrales – Lait – Ail-bran (céréales) – Pêches – Lait chocolaté non sucré – Haricots secs, haricots de Soissons – Haricots beurre, haricots verts – Lentilles brunes, Pois chiches – Marmelade aux fruits (sans sucre ajouté)
22	Prune – Lentilles vertes, Pois cassés – Cerises, pamplemousse
20	Fructose
15	Grains de soja – Abricot
10	Légumes verts – Salades – Tomates, aubergines, poivrons – Ail, oignons, Champignons, etc.

Tableau 1 – Index glycémique de quelques aliments. [64]

b) Index glycémique et métabolisme

L'index glycémique traduit la vitesse d'absorption des glucides par l'intestin grêle, et c'est celle-ci qui explique les effets métaboliques observés.

Le ralentissement d'absorption du glucose après consommation de glucides à IG bas réduit l'élévation glycémique post-prandiale maximale et donc l'élévation post-prandiale de l'insuline et des hormones intestinales, ce qui favorise l'oxydation des acides gras libres (AGL).

À long terme, la réduction des concentrations d'AGL améliore l'insulino-sensibilité.

De plus, la consommation d'un repas à IG bas améliore la tolérance glucidique du second repas, en abaissant les concentrations d'AGL (effet rémanent de Staub-Traugott).

Par conséquent, la consommation d'un régime riche en hydrate de carbone à IG élevé produit une hyperglycémie et une hyper-insulinémie post-prandiales récurrentes qui sont d'autant plus accentuées chez les personnes insulino-résistantes. L'oxydation du glucose est

plus élevée et l'oxydation des AG est moindre tout au long de la période post-prandiale, favorisant ainsi le stockage des lipides.

Ceci s'explique par une élévation de l'expression et de l'activité du complexe enzymatique de synthèse des acides gras dans le tissu adipeux parallèlement à l'augmentation de l'entrée du glucose dans les adipocytes. La lipogenèse augmente également dans le foie par modification de l'expression des gènes des enzymes de la lipogenèse hépatique.

À ces effets aigus sur l'oxydation du substrat énergétique, s'ajoutent, lors d'une alimentation à IG élevé au long cours, des changements d'expression de ces enzymes, diminuant de ce fait le potentiel d'oxydation hépatique des lipides.

Un autre mécanisme a été suggéré pour expliquer l'insulino-résistance lors d'alimentation à index glycémique élevé, la déplétion en chrome, la tyrosine-phosphatase du récepteur d'insuline étant activée par le chrome.

La consommation d'hydrates de carbone sous forme de boissons est responsable de pics hyperglycémiques importants, qui augmentent les pertes urinaires de chrome. La consommation fréquente de repas à IG élevé pourrait causer un épuisement progressif des concentrations en chrome tissulaire.

Ces résultats ont des implications importantes parce qu'ils défient la prétention qu'une calorie est une calorie. Bien que cela demeure incertain, la consommation au long cours de repas à IG élevé favoriserait une accumulation des graisses dans les viscères.

À l'inverse, les régimes à IG bas diminuent la masse grasse abdominale, de façon corrélée, semble-t-il, à une diminution d'expression du gène de la leptine dans le tissu adipeux sous-cutané.

- *Conséquences sur le métabolisme glucido-lipidique*

La consommation de repas à charge glycémique (CG) réduite, en améliorant l'insulino-sensibilité, permet une augmentation de la captation du glucose par le muscle, une augmentation de l'épuration des chylomicrons et une réduction de la synthèse des particules VLDL, des particules LDL petites et denses et une augmentation des particules HDL.

Inversement, la consommation d'aliments à IG élevé augmente les triglycérides et entraîne des modifications défavorables des profils lipidiques et fibrinolytiques, contribuant ainsi au processus athérosclérotique.

- *Conséquences sur la satiété*

Lors de la consommation d'un repas à index glycémique bas, la satiété est prolongée, car la stimulation prolongée des récepteurs des nutriments de l'appareil gastro-intestinal entraîne une rétroaction prolongée, via la cholécystokinine et le glucagon-like peptide 1 au niveau des centres nerveux de la satiété.

À l'inverse, un repas à index glycémique élevé favorise une chute rapide de la glycémie qui déclenche la sensation de faim.

- *Conséquences sur les processus inflammatoires*

Actuellement, les nouvelles perspectives de recherche tentent de mettre en évidence des relations entre l'insulino-résistance et la formation d'antioxydants, responsable des dommages tissulaires, et de la libération des cytokines pro-inflammatoires.

Des études ont prouvé que l'élévation post-prandiale de la glycémie permettait de diminuer proportionnellement la concentration plasmatique des antioxydants (lycopène et la vitamine E), suggérant donc un rôle bénéfique possible des régimes à faible IG sur les dommages tissulaires.

Les études de cas-témoins ont également montré des associations positives entre l'index glycémique et le risque de survenue d'un cancer – du côlon, du sein, de l'ovaire et de la prostate – impliquant l'insulino-résistance et l'IGF. [65]

B. Lipides

1. Généralités

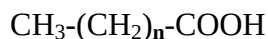
Les lipides constituent un groupe hétérogène de substances insolubles dans l'eau, mais solubles dans les solvants organiques (alcool à chaud, éther, chloroforme, benzène).

2. Biochimie

La structure de base est l'acide gras, composé d'une chaîne hydrocarbonée de diverses longueurs, terminée par un radical acide (COOH). En fait, la grande majorité des lipides alimentaires est sous forme de glycérides (esters de glycérols et d'acides gras), qui sont les principaux vecteurs des acides gras. Les autres lipides sont des molécules plus complexes : phospholipides, cholestérol, sphingolipides, cérides.

a) Acides gras

La plupart ont une forme linéaire répondant à la formule générale :



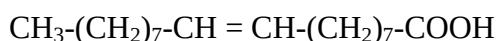
où **n** est de 2 à 20, rarement plus.

Les acides gras se distinguent par un certain nombre de caractères :

- *La longueur de chaîne*, répertoriée par le nombre d'atomes de carbone (presque toujours en nombre pair). Les plus répandus chez l'homme ont 16 et 18 carbones.
- *L'absence ou la présence de doubles liaisons* entre les carbones situés au sein de la chaîne :
 - ✓ Acides gras saturés : $\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{COOH}$;
 - ✓ Acides gras monoinsaturés (une double liaison) ;
 - ✓ Acides gras polyinsaturés :
 - Avec 2 doubles liaisons,
 - Ou 3 doubles liaisons,
 - Ou plus (4, 5, 6 doubles liaisons).
- *La configuration spatiale* de la chaîne des acides gras non saturés, distinguant les formes *cis*-, les plus répandues dans la nature, et les formes *trans*-, présentes en faible quantité dans certains produits animaux, mais qui peuvent être le résultat de transformations industrielles des graisses.
- *La position des doubles liaisons par rapport au COOH* détermine la dénomination chimique.
- *La position de la première double liaison par rapport au CH₃ terminal* détermine la classification physiologique des acides gras (classification en ω ou en n-). On définit ainsi des familles d'acides gras ayant chacune une position particulière de cette première double liaison : en $\omega 3$, $\omega 6$, $\omega 7$, $\omega 9$.

Quelques exemples d'acides gras non saturés courants :

- Acide monoinsaturé : acide oléique C18 : 1 $\omega 9$



- Acides polyinsaturés : on distingue deux familles :
 - ✓ Famille $\omega 6$: le précurseur (essentiel) est l'acide linoléique :
 $C18 : 2 \omega 6 : CH_3-(CH_2)_4-CH=CH-CH_2-CH=CH-(CH_2)_7-COOH$
 - ✓ Famille $\omega 3$: le précurseur (essentiel) est l'acide linoléique :
 $C18 : 3 \omega 3 : CH_3-(CH_2)-CH=CH-CH_2-CH=CH-CH_2-CH=CH-(CH_2)_7-COOH$

Des acides gras inhabituels peuvent être rencontrés dans les végétaux (acides cycliques, acides avec fonctions oxygénées secondaires).

Dénomination commune	Dénomination simplifiée
Acides gras saturés	
Butyrique	C4 : 0
Caproïque	C6 : 0
Caprylique	C8 : 0
Caprique	C10 : 0
Laurique	C12 : 0
Myristique	C14 : 0
Palmitique	C16 : 0
Stéarique	C18 : 0
Arachidique	C20 : 0
Acides gras monoinsaturés	
Palmitoléique	C16 : 1 $\omega 7$
Oléique	C18 : 1 $\omega 9$
Erucique	C20 : 1 $\omega 9$
Acides gras polyinsaturés de la famille $\omega 6$	
Linoléique	C18 : 2 $\omega 6$
Arachidonique	C20 : 4 $\omega 6$
Acides gras polyinsaturés de la famille $\omega 3$	
Linoléique (α -linoléique)	C18 : 3 $\omega 3$
Ecosapentaénoïque (EPA)	C20 : 5 $\omega 3$
Docosahexaénoïque (DHA)	C22 : 6 $\omega 3$

Tableau 2 – Principaux acides gras. [65]

Les corps gras alimentaires ne sont pas constitués de mélanges d'acides gras mais essentiellement par des mélanges de triesters d'acides gras et de glycérol, les triglycérides (figure 36). On rencontre aussi des glycérides partiels, le glycérol étant estérifié par un seul acide gras (monoglycéride), ou deux acides gras (diglycérides).

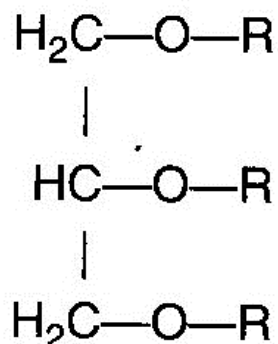


Figure 36 – Formule générale d'un triglycéride. [65]

Les triglycérides peuvent être homogènes (glycérol lié à 3 molécules d'un même acide gras), ou mixtes (acides gras différents). Du fait du nombre élevé des formes d'acides gras et des multiples possibilités de leur combinaison avec le glycérol, les corps gras alimentaires sont donc des mélanges complexes.

b) Phospholipides

Ils comportent du glycérol, de l'acide phosphorique et souvent une base azotée :

- phosphatidylcholine (le plus abondant) ;
- phosphatidyléthanolamine moins répandu ;
- phosphatidylsérine rare dans les graisses végétales, plus courant dans les graisses animales.

Les phospholipides contiennent deux molécules d'acides gras, dont la diversité est moindre que dans les triglycérides. Signalons d'autres lipides présents surtout dans le règne animal : sphingolipides, cardiolipides, glucolipides, cérebrosides...

c) Les stérols

Les stérols sont des composés tétracycliques avec 27 à 28 carbones, ils sont représentés uniquement par le cholestérol dans le règne animal, et par de très nombreuses variétés dans les végétaux (le plus abondant étant ici le sitostérol). Le cholestérol n'est généralement présent, dans les végétaux qu'à l'état de traces. Les stérols végétaux

(phytostérols) sont présents dans les lipides des plantes, notamment dans les huiles de noix, de graines, de céréales, de fruits, mais aussi dans le pain, les légumineuses et les légumes. Des margarines enrichies en stérols végétaux sont disponibles. En effet, on a constaté des propriétés hypocholestérolémiantes des stérols végétaux, conséquences d'une compétition avec le cholestérol au niveau de l'absorption intestinale. Dans les stérols alimentaires (cholestérol et phytostérols), la fonction alcool est soit libre (cholestérol libre) soit estérifiée par un acide gras (cholestérol-ester). [65]

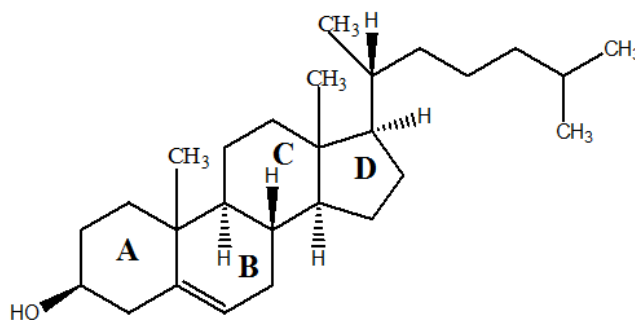


Figure 37 – Représentation biochimique du cholestérol [66]

3. Acides gras et alimentation

a) Acides gras monoinsaturés (AGMI)

Ce sont des acides gras dont la molécule ne comprend qu'une seule liaison double. On les trouve principalement sous forme d'acide oléique (oméga 9). Ils ne font pas partie des acides gras dits "essentiels" car notre organisme peut les fabriquer à partir d'autres acides gras (les acides gras saturés).

On les trouve dans les graisses animales et végétales comme dans les huiles d'olive (76 %), d'arachide (49 %), de soja (44 %) et de sésame (41 %) mais aussi dans les oléagineux (noix de macadamia, noisette, noix de cajou, amande, pistache, arachide), les fruits (olive ou avocat) et dans la viande (poulet, porc, bœuf, agneau).

L'apport recommandé en AGMI est de 65% des apports des lipides totaux de notre alimentation.

Les acides gras mono-insaturés ont pour effet de faire baisser le taux de LDL-cholestérol (mauvais). Ils contribuent donc à réduire les risques de maladies cardiovasculaires et d'hypertension. Pour ce qui concerne la prévention du cancer, des études montrent une plus faible présence de cancers du sein, du côlon et de la prostate chez les populations dont l'alimentation est de type « méditerranéen » avec une consommation élevée d'olives et d'huile

d'olive. Les chercheurs pensent que cet effet protecteur pourrait être attribué en priorité aux antioxydants que l'olive renferme en abondance mais il est possible qu'un apport élevé en oméga 3 et en oméga 9 puisse contrer un effet cancérigène des oméga 6.

b) Acides gras polyinsaturés (AGPI)

L'organisme ne peut fabriquer deux acides gras polyinsaturés. C'est pourquoi on les appelle *Acides Gras Essentiels* (AGE). Ils doivent être apportés très régulièrement par l'alimentation.

A partir d'eux, l'organisme fabrique d'autres acides gras polyinsaturés et différentes substances. Ces acides gras essentiels sont : l'acide linoléique ou oméga 6 et l'acide alphalinolénique ou oméga 3.

Les principales sources d'acides gras de type oméga 6 sont les huiles de maïs, de soja et de tournesol. Ces huiles résistent mal aux hautes températures et devraient être réservées à la cuisson au four.

Les graines de lin et de chanvre et les huiles qu'on en tire sont particulièrement riches en acides gras de type oméga 3. Elles ne doivent surtout pas être chauffées si on veut préserver ces fragiles acides gras. Les poissons gras comme le saumon, le maquereau ou les sardines sont également de bonnes sources d'oméga 3.

Les apports en AGPI doivent représenter 15 % des apports en lipides.

Les oméga 6 et 3 interviennent dans tous les processus de reproduction et de croissance et la formation des cellules. Seuls les oméga 3 interviennent dans la formation des membranes des cellules, dans celle de la rétine, dans l'intégrité de la peau, dans les fonctions rénales dans les réactions inflammatoires, allergiques, vasculaires, immunitaires et dans l'agrégation plaquettaire, premier stade de la coagulation du sang. Ils jouent donc un rôle protecteur puisque c'est un caillot qui bouche une artère coronaire et crée un infarctus.

Les oméga 3 ont un effet protecteur reconnu sur la fonction cardiovasculaire ainsi que sur les fonctions cognitives tandis que les oméga 6 ont un impact positif sur les taux de lipides sanguins, mais en excès, ils empêchent l'utilisation optimale des oméga 3 par l'organisme. Le rapport oméga 6/oméga 3 dans l'alimentation occidentale est de 10/1 à 30/1, tandis qu'il devrait être, idéalement, de 1/1 à 4/1.

c) *Acide gras saturés (AGS)*

Ils se trouvent surtout dans les graisses d'origine animale telles que le beurre, la crème fraîche, les fromages, le saindoux ou le lard. On les trouve également dans certaines huiles végétales tropicales comme l'huile de palme et dans les produits alimentaires fabriqués à partir de ces sources de gras comme les pâtisseries, les charcuteries ou les produits laitiers comme les fromages à plus de 40% de matières grasses.

Les apports en AGS ne doivent pas dépasser 25 % des apports en lipides.

Les acides gras saturés ont tendance à augmenter le taux du cholestérol sanguin et surtout celui du LDL cholestérol (mauvais) et à favoriser les dépôts de cholestérol dans les artères augmentant les risques de maladies cardiovasculaires. [67]

d) *Acides gras trans (AGT)*

Un acide gras *trans* est un acide gras insaturé possédant une ou plusieurs doubles liaisons de configuration géométrique *trans*, c'est-à-dire dont les substituants se situent de part et d'autre du plan de la liaison éthylénique. Par opposition, un acide gras *cis*, cas le plus fréquent dans la nature, possédera les deux substituants du même côté du plan de la liaison éthylénique. [68]

Les acides gras *trans*, ou graisses hydrogénées, ont été créés par les ingénieurs agroalimentaires à la demande des industriels car ils sont plus stables et plus faciles à utiliser que les acides gras naturels.

Ces graisses hydrogénées sont dangereuses pour le cœur et les vaisseaux sanguins car elles favorisent les dépôts de plaques d'athérome. Elles devraient représenter moins de 2 % des graisses ingérées.

On trouve les graisses hydrogénées essentiellement dans les soupes en conserve, les pâtisseries et biscuits industriels, certaines pâtes à tarte et margarines, les biscuits apéritifs, les pâtes à tartiner ou encore les barres de céréales.

Rechercher la présence de graisses hydrogénées dans les ingrédients des produits que l'on achète permet de les éviter. Ces ingrédients sont classés par ordre décroissant en quantité. Si la mention « huile hydrogénée » se trouve en début ou milieu de liste, il est préférable de chercher un produit similaire où elle n'apparaît qu'en fin de liste des ingrédients (ou pas du tout). [69]

4. Le cholestérol

Le cholestérol est présent dans de nombreux tissus mais il est concentré essentiellement dans le cerveau et la moelle épinière. Il est transporté dans le sang par de grosses molécules qu'on appelle "les lipoprotéines".

On distingue 2 types de lipoprotéines :

- Les *LDL* (low density lipoproteins) qui transportent le cholestérol du foie aux organes. Quand le cholestérol est en excès, il s'accumule sur les parois des vaisseaux sanguins et il devient dangereux pour l'organisme : on l'appelle "le mauvais cholestérol".
- Les *HDL* (high density lipoproteins) qui transportent le cholestérol en sens inverse et empêche la fixation de celui-ci dans les tissus et les parois des vaisseaux sanguins : on l'appelle le "bon cholestérol".

Environ 70 % du cholestérol est endogène, c'est à dire qu'il est fabriqué par l'organisme au niveau du foie et de l'intestin. Le reste est apporté par l'alimentation. Les sources de cholestérol alimentaire sont uniquement d'origine animale : abats, graisses animales (beurre, lard, saindoux, crème fraîche,...), charcuteries, jaunes d'œufs, crustacés, fromages et viandes. L'apport endogène de cholestérol est normalement suffisant pour couvrir les besoins de l'organisme. Plus l'alimentation est pauvre en cholestérol, plus l'organisme en synthétise et inversement.

Cependant, pour limiter les risques de maladies cardiovasculaires, il est souhaitable de ne pas dépasser un apport de 1000 mg par jour. Chez les personnes ayant d'importants troubles cardiovasculaires et/ou une hypercholestérolémie sévère, on essaie de ne pas apporter plus de 300 mg de cholestérol par jour. [70]

5. Rôles des lipides

a) Rôle d'énergie

L'oxydation d'un gramme de lipide libère 9 kcal. Il s'agit du nutriment le plus énergétique.

b) Rôles liés au tissu adipeux : réserve, isolant et endocrine

Le tissu adipeux représente l'essentiel de la masse grasse du corps. Il correspond habituellement chez l'adulte à 8 à 10 kg du poids corporel. Les femmes ont en moyenne 20 à 25 % de masse grasse et les hommes 15 à 20 %. Il existe bien sûr de fortes variations individuelles liées à la façon de s'alimenter, au degré d'activité physique, à l'âge et aux facteurs génétiques.

- *Rôle de réserve*

Le tissu adipeux a une fonction de réserve énergétique bien identifiée, essentiellement sous forme de triglycérides contenus dans les adipocytes.

- *Rôle d'isolant*

Le tissu adipeux est un isolant thermique et les humains ne sont homéothermes que grâce à sa présence sous-cutanée. Ils ne subissent pas les variations de température extérieure comme les animaux à sang « froid ».

- *Rôle endocrine*

Le tissu adipeux n'est pas qu'un tissu de réserve inerte, il a un rôle endocrine. Les adipocytes sécrètent différentes substances dont la *leptine* qui intervient sur les prises alimentaires. Leur équipement enzymatique permet également de transformer certaines molécules. Une réduction trop importante du tissu adipeux, masse grasse inférieure à 10 % du poids total, induit des infertilités chez la femme. A l'inverse, un excès de masse grasse, surtout androïde, majore l'insulinorésistance par le biais notamment de l'*adiponectine* (hormone sécrétée par le tissu adipeux). Le tissu adipeux, alors que toutes ses fonctions ne sont pas encore élucidées, joue un rôle hormonal dont l'importance apparaît de plus en plus essentielle. Quantitativement, les lipides se concentrent au niveau du tissu adipeux, mais ils sont présents dans toutes les structures cellulaires.

c) Rôle de structure

Les lipides, notamment par l'intermédiaire des différents phospholipides composés en grande partie d'acides gras polyinsaturés, participent à la formation de la membrane de chaque cellule de l'organisme. Leur rôle est tout à fait déterminant dans le maintien de l'intégrité cellulaire, du degré de rigidité et dans les différents échanges entre le milieu intracellulaire et extracellulaire. Par leur position et leur composition, les glycolipides sur la

membrane cellulaire mais aussi les phospholipides jouent un rôle dans la transduction des messages (fonction de récepteurs).

d) Rôle de précurseur de molécules

Les lipides sont à l'origine de nombreuses molécules :

- Cholestérol : les hormones stéroïdiennes, acides biliaires, vitamine D synthétisée par la peau sous l'effet des rayons ultraviolets ;
- Acides gras polyinsaturés : les prostanoïdes (prostaglandine, thromboxane, leucotriène) ;
- Phospholipides : le surfactant pulmonaire.

e) Rôle de transport des vitamines liposolubles

Les vitamines A, D, E, K sont liposolubles et sont absorbées avec les graisses alimentaires, à l'opposé des hydrosolubles représentées par la vitamine C et celles du groupe B.

f) Rôle dans la prévention de nombreuses pathologies

- *Maladies cardiovasculaires*

Une protection est apportée par la consommation suffisante d'acides gras polyinsaturés de la famille des oméga 3. Ils limitent la formation de la plaque d'athérome et ont un rôle antiagrégant plaquettaire, à l'inverse des acides gras saturés.

- *Maladies inflammatoires et cancers*

De nombreuses études tendent également à démontrer l'importance d'une alimentation riche en acide gras de type oméga 3 dans la prévention des pathologies inflammatoires et cancéreuses. Leurs apports réguliers dans la ration alimentaire, associés à d'autres éléments comme les micronutriments antioxydants naturels des aliments (bêta-carotène, vitamine C, vitamine E et sélénium) et les fibres végétales assurent un certain degré de protection. [71]

6. Où trouve-t-on les lipides ?

Les lipides sont de deux origines :

- *Animale* : Beurre, crème, saindoux, viande, charcuterie, poisson, etc ;
- *Végétale* : Huiles, fruits oléagineux (noix, noisettes, amandes, tournesol, etc).

Les graisses sont dites *cachées* lorsqu'elles sont contenues dans les aliments (charcuterie, viande, fromage, etc.) ; elles représentent 80 % des graisses que nous consommons. Les matières grasses *visibles* sont celles que nous rajoutons à nos aliments et correspondent aux 20 % restant.

7. Besoins en lipides

Dans une alimentation équilibrée, les lipides devraient représenter 30 % de l'apport énergétique total, dont un maximum de 10 % sous forme d'acides gras saturés.

Pour avoir une idée de la consommation journalière de lipides en grammes :

- pour une femme consommant environ 2000 kcal il faut 67 g de lipides (30 % de $2000 = 600$ divisé par 9 kcal = 67 g) ;
- pour un homme consommant environ 2500 kcal, il faut 84 g de lipides par jour (30% de $2500 = 750$ divisé par 9 kcal = 84 g). [72]

8. Lipides et obésité

Des régimes pauvres en glucides complexes et en fibres, mais riches en lipides sont associés à une forte prévalence, de l'obésité, de maladies cardiovasculaires et de certaines formes de cancers. Les nutritionnistes indiquent qu'il serait prudent de limiter la consommation de lipides afin qu'elle ne dépasse pas 30%. Les lipides ou les graisses sont toutefois indispensables car ils fournissent une source concentrée d'énergie, des acides gras essentiels et des vitamines liposolubles.

Pourtant, malgré les conseils, il existe en général une forte résistance à la consommation de régimes pauvres ou appauvris en lipides. De plus, l'évaluation sensorielle du contenu en graisses d'un aliment est parfois difficile. Ainsi, certains aliments riches en graisses, notamment les aliments solides (chocolat, crèmes glacées, par exemple), ne sont pas perçus comme tels, et l'attention se focalise alors sur le composé le mieux perçu, en l'occurrence, le sucre. [73]

C. Protéines

1. Généralités

Les protéines sont des éléments essentiels à la croissance et à la réparation tissulaire, au bon fonctionnement des cellules vivantes et à leur structure. Les hormones, comme l'insuline qui contrôle la glycémie sanguine, les enzymes comme l'amylase, les lipases et les

protéases, sont essentielles à la digestion des aliments ; les anticorps permettent de combattre les infections ; les protéines musculaires interviennent dans la contraction musculaire, etc.

2. Biochimie

Les protéines sont composées d'acides aminés (leurs éléments constitutifs) qui sont liés les uns aux autres. Il existe environ 20 acides aminés différents chez les végétaux et chez les animaux. Une protéine type peut contenir plus de 300 acides aminés. Chaque protéine possède un nombre spécifique d'acides aminés organisés en séquence particulière.

Les acides aminés peuvent être classés en deux catégories : essentiels (acides aminés indispensables qui ne peuvent être produits lors du métabolisme par l'organisme et que l'on doit se procurer par l'alimentation) et non essentiels (acides aminés facultatifs qui peuvent être produits de manière endogène par l'organisme à partir d'autres protéines). Huit acides aminés (leucine, isoleucine, valine, thréonine, méthionine, phénylalanine, tryptophane et lysine) sont réputés essentiels pour les adultes et neuf (tous les acides aminés cités précédemment, plus l'histidine) pour les enfants. [74]

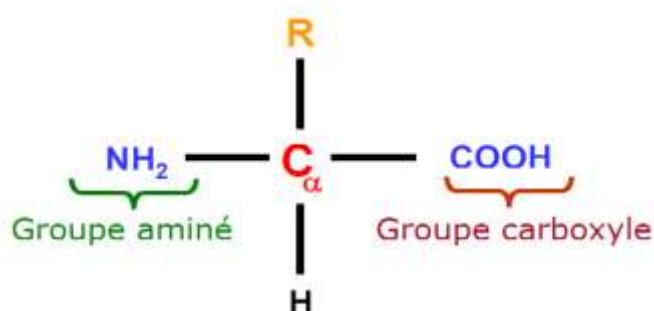


Figure 38 – Structure d'un acide aminé [75]

avec R = Radical ou chaîne latérale (partie variable des acides aminés)

3. Rôles des protéines

Selon leur rôle, on classe les protéines en trois catégories :

- *Rôle structurel*

C'est le rôle le plus connu. Les protéines sont les molécules de construction et de réparation des tissus du corps humain. Ce rôle de construction est indispensable pour les muscles, mais aussi pour tous les organes du corps.

- *Molécules actives*

Les protéines sont des molécules biologiquement actives qui jouent un grand rôle dans les réactions chimiques du corps. Ces molécules peuvent être des enzymes, des hormones, de la kératine ...

Elles participent à l'immunité, la digestion, le transport de l'oxygène, la transmission de l'influx nerveux...

- *Rôle énergétique*

En cas d'épuisement des glucides et des lipides, les protéines servent de source d'énergie. Elles permettent de récupérer 4 kcal par gramme de protéines. Ce rôle reste faible, et en moyenne seulement 3% de l'énergie utilisée par les muscles provient des protéines. [76]

4. Besoins en protéines

Le besoin nutritionnel moyen en protéines a été réévalué à 0,66 g/kg/j et l'apport nutritionnel conseillé à 0,83 g/kg/j chez l'adulte en bonne santé.

Il est difficile, compte tenu de l'insuffisance de données disponibles, de définir une limite supérieure de sécurité pour l'apport protéique. Dans l'état actuel des connaissances, des apports entre 0,83 et 2,2 g/kg/j de protéines (soit de 10 à 27 % de l'apport énergétique chez des individus ayant des apports énergétiques moyens, c'est-à-dire de 33 kcal/kg/j) peuvent être considérés comme satisfaisants pour un individu adulte de moins de 60 ans non obèse, non sportif, ayant une fonction rénale normale et suivant un régime non restreint, alors que des apports compris entre 2,2 et 3,5 g/kg/j seront considérés comme élevés et des apports supérieurs à 3,5 g/kg/j très élevés. Ces valeurs de 2,2 et de 3,5 g/kg/j ont été déterminées à partir de la capacité maximale d'adaptation de l'uréogénèse chez l'adulte (pour un homme de 70 kg). [77]

5. Où trouve-t-on les protéines ?

Les aliments riches :

- en protéines d'origine animale sont : les viandes, les poissons, les crustacés, les mollusques, les œufs, le lait et les produits laitiers (yaourt, fromage blanc, petit suisse, fromage...).
- en protéines d'origine végétale sont : les céréales (quinoa, orge, blé, avoine, seigle...), les légumineuses (soja, lentilles, haricots secs, flageolets, pois chiches, pois cassés...).

La qualité nutritionnelle des protéines dépend de leur valeur biologique qui est déterminée par leur teneur en acides aminés essentiels. Plus une protéine contient d'acides aminés essentiels, plus elle est considérée comme étant une protéine de haute valeur biologique (la protéine de l'œuf étant la protéine de référence car elle contient tous les acides aminés essentiels).

Les protéines végétales sont souvent de moins bonne qualité nutritionnelle que les protéines animales car il leur manque souvent un ou plusieurs acides aminés essentiels. Cependant, on peut rétablir l'équilibre en acides aminés, en les associant au cours du même repas. Cette complémentarité est utilisée depuis longtemps et forme la base du régime végétarien.

Exemples de bonnes associations :

- Semoule + pois chiche,
- Soja + riz,
- Maïs + haricot rouge,
- Lentilles + riz. [78]

Attention : 100 g de viande $\neq$ 100 g de protéines !

Par exemple, 100 g de poulet contiennent environ 20 g de protéines, mais également des lipides, des glucides et beaucoup d'eau...

En pratique : 20 grammes de protéines =

- 100 g de viande rouge ou blanche
- 80 g de thon en conserve
- 3 œufs
- 130 g de maquereaux, sardine ou hareng
- 250 g de fromage blanc 0 %
- 60 g de fromage allégé
- ½ L de lait. [79]

D. L'alcool

1. Nutriment

L'oxydation de l'alcool *in vivo* dégage de la chaleur (7 kcal/g) ; cette oxydation se fait essentiellement dans le foie et la chaleur dégagée contribue à entretenir le métabolisme basal en économisant une quantité d'énergie correspondante de glucides et de lipides.

L'alcool est donc bien un nutriment qui présente cependant, par rapport à d'autres nutriments énergétiques, quatre particularités :

- Il ne peut couvrir qu'une partie de la dépense énergétique basale ;
- Il fournit, certes de la chaleur, mais ce débit de chaleur n'est pas modulé par le mécanisme de thermorégulation et, à ambiance froide, la vasodilatation provoquée par l'alcool, source de déperditions, contrebalance l'effet thermogénétique ;
- L'énergie provenant de l'éthanol n'est pas utilisée préférentiellement pour le travail musculaire et celui-ci ne modifie que faiblement la vitesse d'oxydation ;
- Il n'existe pas de formes particulières de stockage d'énergie provenant de l'éthanol à la seule exception de quelques pour cent transformés en lipides corporels ; le reste étant obligatoirement dépensé sous forme de chaleur.

2. Effets physiopathologiques de l'alcool

a) Effets aigus

L'ivresse comporte à faible dose une euphorie et une augmentation de la confiance en soi par un mécanisme impliquant les opiacés endogènes.

A dose plus forte, par un mécanisme inconnu, s'y ajoute une incoordination motrice avec troubles de l'équilibre.

L'ingestion, même d'une dose modérée unique d'alcool, provoque une congestion de la muqueuse gastrique et, dans les heures qui suivent, une stéatose hépatique. Ces deux effets sont rapidement réversibles.

L'alcool a un effet diurétique par accélération du passage de l'eau intracellulaire dans la circulation générale et par freination de l'hormone antidiurétique.

Le dosage de la gamma-glutamyl-transférase ou gamma GT est un bon indice d'alcoolisation.

b) Effets chroniques

La complication la plus grave de la consommation alcoolique habituelle est la cirrhose hépatique. Il existe des cirrhoses non éthyliques mais, en France, elles constituent moins de 10 % du total.

De plus, la consommation de l'éthanol est la principale cause en France de diverses polynévrites, et il est clairement démontré que l'alcoolisation est un facteur de risque des cancers bucco-œsophagiens et gastriques, des pancréatites aiguës et chroniques et des gastrites chroniques.

Chez les femmes, on a constaté que la consommation de boissons alcoolisées était associée à une augmentation du risque de cancer du sein.

3. Effets bénéfiques

Outre l'effet tranquilisant déjà signalé, il est prouvé que la consommation habituelle d'alcool est un facteur de protection vasculaire. Parmi les pays développés ayant en particulier une consommation de graisses semblable, la morbidité cardiovasculaire est inversement liée à la consommation alcoolique moyenne. Le mécanisme impliqué est l'augmentation du taux des HDL. [80]

À la lumière des données actuelles, une consommation modérée et régulière jusqu'à 10-20 g/j (correspondant à 1-2 verres) est associée à un moindre risque de survenue de maladie cardiovasculaire. Par ailleurs, à consommation quotidienne moyenne identique, une consommation régulière serait meilleure qu'une consommation occasionnelle de quantités plus importantes. Enfin, pour ce qui est de la maladie cardiovasculaire, aucun type de boisson ne semble supérieur aux autres. [81]

4. Equivalences en alcool

Il y a à peu près autant d'alcool pur dans chacun de ces verres : soit 10 g d'alcool ou une énergie de 70 kcal pour :

- Un verre à bordeaux de 10 cl de vin rouge ou blanc à 12° ou une flûte de champagne ;
- Un verre de 7 cl d'appétitif à base de vin à 18° ;
- Un « demi » de 25 cl de bière à 5° ou un grand verre de cidre à 5° (25 cl) ;
- Une dose de 2,5 cl de whisky, de pastis ou de digestif à 45°. [82]

IV. Vitamines

A. Rôles des vitamines

Les vitamines sont des substances sans valeur énergétique mais vitales. A l'exception de deux d'entre elles (vitamines K et D), nous ne sommes pas capables de les fabriquer et leur apport par l'alimentation est primordial pour le fonctionnement harmonieux de notre organisme. Contrairement aux macronutriments (protéines, glucides ou sucres, lipides ou graisses) elles exercent leurs actions à très faibles doses.

Globalement, elles sont impliquées dans de nombreuses fonctions biologiques : construction (croissance, développement du squelette...), fonctionnement et entretien (transformation et utilisation des macronutriments, vision, coagulation du sang, systèmes musculaire, nerveux, immunitaire, fabrication d'ADN, antioxydants...).

Le rôle d'un apport adéquat en vitamines dans la prévention de nombreuses pathologies (maladies liées au vieillissement, maladies cardiovasculaires, cancers) est de plus en plus démontré, mais la surconsommation de vitamines peut avoir des effets néfastes à long terme.

Quel que soit le mode de stockage, de conservation et de préparation des aliments, les pertes en vitamines, essentiellement hydrosolubles, sont inévitables. En effet, les vitamines sont caractérisées par leur grande sensibilité vis à vis de l'oxygène, de la lumière, de l'eau et de la chaleur.

B. Groupes de vitamines

Les vitamines *liposolubles* sont solubles dans les graisses, et l'organisme peut les mettre en réserve. Elles sont essentiellement apportées par les aliments d'origine animale et les huiles végétales. Ce sont les vitamines A, D, E et K.

Les vitamines *hydrosolubles* sont solubles dans l'eau et ne sont pas stockées dans l'organisme (à l'exception de la vitamine B12) ; leurs apports doivent donc être assurés quotidiennement par notre alimentation. Ces vitamines sont apportées par la quasi-totalité des groupes d'aliments (viande, poisson, œufs, produits laitiers, céréales, fruits et légumes). Ce sont la vitamine C et les vitamines du groupe B (B1, B2, B3 ou PP, B5, B6, B8, B9 et B12).

[83]

1. Vitamines liposolubles

a) Vitamine A

Elle est indispensable à une bonne vision, en particulier en situation de lumière crépusculaire. Elle participe également au maintien en bon état de la peau et des muqueuses. En outre, elle a une action sur le système immunitaire, la différenciation et la croissance cellulaire.

b) Vitamine D

Elle joue deux rôles essentiels. D'une part, elle assure une minéralisation optimale des os lors de la croissance, mais aussi tout au long de la vie pour leur renouvellement. D'autre part, elle module l'absorption intestinale du calcium et contribue à la stabilité du taux de calcium dans le sang et dans les tissus. Une partie de nos besoins est couverte par une exposition régulière et modérée de la peau au soleil.

c) Vitamine E

La vitamine E possède des propriétés anti-oxydantes. Elle agit en particulier au niveau des membranes cellulaires et des lipoprotéines.

d) Vitamine K

Elle est indispensable à la coagulation sanguine et favorise la fixation du calcium sur la matrice protidique de l'os. [84]

2. Vitamines hydrosolubles

a) Vitamine C

Elle joue des rôles multiples. Notamment, elle stimule les réactions de défense de l'organisme contre les attaques infectieuses (bactériennes ou virales) et donc renforce notre système immunitaire. Elle est aussi impliquée dans les mécanismes d'absorption intestinale du fer. Elle contrôle la formation du tissu conjonctif (collagène) et de la matrice protidique du tissu osseux. Du fait de ses propriétés anti-oxydantes, elle peut piéger les radicaux libres et ainsi protéger les cellules de leurs effets toxiques.

b) Vitamine B1 (ou thiamine)

Elle agit sur la transmission de l'influx nerveux. Elle joue également un rôle essentiel dans le métabolisme énergétique des glucides. Il faut donc veiller à avoir un apport suffisant en vitamine B1 si le régime alimentaire est riche en glucides.

c) Vitamine B2 (ou riboflavine)

Elle est impliquée dans l'ensemble des réactions biochimiques de production d'énergie à partir des glucides et des lipides. Par ailleurs, elle intervient dans les phénomènes de vision et favorise le maintien en bon état de la peau et des muqueuses.

d) Vitamine B3 (ou vitamine PP ou niacine)

Elle entre dans la constitution de systèmes enzymatiques qui sont essentiels au métabolisme des glucides, des lipides et des protéines. Ainsi, elle participe à la fourniture d'énergie. Elle intervient également dans le fonctionnement du système nerveux.

e) Vitamine B5 (ou acide pantothénique)

Elle intervient dans le métabolisme des glucides, des lipides et des acides aminés. Elle favorise ainsi l'activité cellulaire, en particulier au niveau de la peau, des cheveux et des muqueuses.

f) Vitamine B6 (ou pyridoxine)

La vitamine B6 est impliquée dans le métabolisme des protéines. Il faut donc veiller à avoir un apport suffisant en vitamine B6 si le régime alimentaire est riche en protéines. Elle intervient également dans la synthèse des neurotransmetteurs, la libération du glucose à partir du glycogène (forme de réserve du glucose) et dans la formation de l'hémoglobine des globules rouges.

g) Vitamine B8 (ou vitamine H ou biotine)

La vitamine B8 participe à de nombreuses réactions biochimiques au niveau cellulaire, que ce soit pour le métabolisme des glucides, des protides ou des lipides.

h) Vitamine B9 (ou folates)

Elle joue un rôle clé dans le renouvellement de toutes les cellules de l'organisme : globules rouges et blancs, cellules de la peau, du foie, de l'intestin, cellules nerveuses, etc. De ce fait, les femmes en âge d'avoir des enfants doivent veiller à avoir un bon apport en cette vitamine. Elle est également impliquée dans la synthèse des neuromédiateurs, indispensables au bon fonctionnement du cerveau et du système nerveux en général. Enfin, la vitamine B9 agit sur les globules rouges et favorise une bonne oxygénation des cellules.

i) Vitamine B12 (ou cobalamines)

Elle est nécessaire à la formation des globules rouges : elle est anti-anémique. Elle est indispensable au renouvellement cellulaire et contribue, de ce fait, au maintien en bon état de la peau et des cellules nerveuses.

j) Béta-carotène

Le bêta-carotène est en réalité une pro-vitamine : c'est un précurseur végétal de la vitamine A. En outre, il possède des propriétés anti-oxydantes puisqu'il est capable de piéger des radicaux libres. [85]

V. Oligoéléments et macroéléments

1. Définitions

L'oligoélément est un élément de nature minérale, présent dans le corps humain à un taux inférieur à 1 mg par kg de poids corporel. Certains oligoéléments sont dits "essentiels" (chrome, cuivre, fer, fluor, iode, sélénium, zinc) car indispensables au bon fonctionnement de l'organisme, mais ne sont pas synthétisés par celui-ci et doivent donc être apportés par l'alimentation.

Toute carence entraîne un trouble fonctionnel nécessitant une supplémentation à dose physiologique. D'autres oligoéléments sont considérés comme potentiellement indispensables et sont dits "non essentiels" (aluminium, argent, bismuth, or, manganèse, nickel, lithium...). Aucune action physiologique ne leur est attribuée. En revanche, ils sont dotés de propriétés pharmacologiques indiscutables à dose pondérée.

Cela est différent d'autres éléments minéraux présents en quantité plus importante dans l'organisme (de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de grammes) que l'on appelle macroéléments (calcium, chlore, phosphore, potassium, magnésium, sodium et soufre). [86]

2. Oligoéléments

a) Chrome

En présence de chrome, la sensibilité à l'insuline est améliorée et l'utilisation cellulaire du glucose est régulée. Le chrome intervient aussi dans le métabolisme lipidique en augmentant les taux sanguins du cholestérol HDL et en abaissant ceux des triglycérides. Via son action sur l'insuline, le chrome est de plus impliqué dans le métabolisme des hormones stéroïdes, en particulier en régulant le cortisol.

Des apports nutritionnels conseillés (ANC) de 50 à 70 $\mu\text{g/j}$ pour l'adulte et de 125 $\mu\text{g/j}$ à partir de 70 ans ont été proposés en France. Ces recommandations s'appuient sur l'absence de signes cliniques de carence pour un apport de 50 $\mu\text{g/j}$ et sur l'absence de toxicité à 200 $\mu\text{g/j}$. Cependant, ces recommandations sont impossibles à atteindre pour un apport calorique de 2 500 kcal/j. L'apport estimé en Amérique du Nord comme en Europe atteint rarement 50 % à 60 % des apports conseillés, et se situe en réalité la plupart du temps entre 30 et 50 $\mu\text{g/j}$.

b) Sélénium

La plupart des données récentes sur le rôle du sélénium en nutrition humaine concernent ses effets bénéfiques au cours du vieillissement sur la longévité, et le maintien des fonctions cognitives, son rôle clé dans l'immunité, les relations entre le statut sélénié et les infections virales et la controverse autour des propriétés anticarcinogènes potentielles des supplémentations en sélénium à doses supranutritionnelles.

L'apport optimal est difficile à définir, mais la dose de 1 $\mu\text{g/kg}$ de poids corporel est une dose qui semble adéquate pour maintenir pertes et apports en équilibre. De tels niveaux d'apports conduisent à une saturation de l'activité enzymatique de la glutathion peroxydase, mais d'autres sélénoprotéines optimisent néanmoins leurs activités pour des apports moindres en sélénium.

Ce sont les aliments protéiques (viandes, poissons, crustacés, abats, œufs, céréales) qui sont les plus riches en sélénium, mais leur biodisponibilité varie de 20 % à 50 % pour les produits

de la mer et atteint plus de 80 % pour les céréales et la levure de bière. La sélénométhionine semble être le composé majeur des aliments solides, alors que le sélénium inorganique (sélénite et sélénate) est présent dans les eaux de boisson. Les groupes thiols et la vitamine C favorisent la biodisponibilité du sélénium, alors que les fibres et les métaux lourds la diminuent. [87]

c) Fer

L'organisme d'un homme adulte renferme environ 4 g de fer. Il joue un rôle essentiel dans de nombreuses fonctions biologiques. Il intervient dans la constitution de l'hémoglobine (pigment respiratoire des globules rouges) et transporte ainsi l'oxygène des poumons jusqu'aux cellules. Il forme la myoglobine (forme de réserve de l'oxygène du muscle) et constitue aussi des enzymes.

Dans l'organisme, le fer existe sous deux formes :

- le *fer héminique* (70%) : entre dans la constitution de l'hémoglobine (60% du fer total du corps), de la myoglobine, et des enzymes.
- Le *fer non héminique* (30%) : correspond aux formes de transport et de réserve de fer. [89]

Le besoin moyen en fer correspond à la quantité de fer qui, une fois absorbée, permet d'équilibrer les pertes (sueur, selles, urines, menstruations chez la femme), assurant ainsi l'homéostasie du fer. Ce besoin est de l'ordre de 1 mg/j chez l'homme et de 2 mg/j chez la femme jeune, mais varie selon les circonstances physiologiques. À certaines périodes de la vie, dans les situations de croissance (jeune enfant, grossesse), ce besoin devient particulièrement important, ce qui fait de ces groupes de populations ceux présentant les plus forts risques de carence en fer.

Le besoin nutritionnel est calculé en prenant en considération la quantité de fer qui doit être réellement ingéré pour que le besoin physiologique soit satisfait. Ce besoin nutritionnel a été établi pour la population française sur la base d'une absorption de 10 % du fer par un régime alimentaire de type français. Pour le fer, ce besoin nutritionnel correspond aux apports nutritionnels conseillés pour la population française. [87]

Populations	Apports nutritionnels conseillés (ANC)
Enfants	
1–6 ans	7 mg/j
7–9 ans	8 mg/j
10–12 ans	10 mg/j
Adolescents (13–19 ans)	13 mg/j
Adolescentes (13–19 ans)	16 mg/j
Hommes adultes	9 mg/j
Femmes adultes	16 mg/j
Hommes > 65 ans	9 mg/j
Femmes > 55 ans	9 mg/j
Personnes âgées > 75 ans	10 mg/j
Femmes enceintes	30 mg/j au 3 ^e trimestre
Femmes qui allaitent	10 mg/j

Tableau 3 – Tableau des apports nutritionnels conseillés en fer suivant la population. [87]

De nombreux aliments contiennent du fer (pour 100 grammes d'aliment) :

- Abats, foie de veau : 10 à 30 mg
- Cacao : 12 mg
- Coquillages, huîtres : 8 à 23 mg
- Légumes secs : 5 à 7 mg
- Viande, volailles, gibiers : entre 2 et 3 mg
- Légumes frais : entre 2 et 8 mg
- Œufs : 3 mg. [88]

De plus, il existe des aliments activateurs et inhibiteurs de l'assimilation du fer, lorsqu'ils sont consommés en même temps que les aliments riches en fer :

- aliments activateurs : vitamine C (persil, jus de citron, kiwis, orange, pamplemousse...) et fructose (sucre des fruits) augmentent l'assimilation du fer.
- aliments inhibiteurs : thé, café, laitages, épinards, oseille (et autres légumes feuilles) bloquent l'assimilation du fer. [89]

d) Zinc

Le zinc est essentiellement présent dans les muscles et les os. Certains tissus ou organes comme le foie, les reins, la prostate, les cheveux ou les yeux ont une teneur élevée. Il active un très grand nombre d'enzymes de l'organisme et intervient dans de nombreux métabolismes : glucides, protéines, acides nucléiques.

Il participe à la croissance (celle des fœtus pendant la grossesse, puis celle des enfants et des adolescents), la multiplication cellulaire, la reproduction, la fertilité, les différentes étapes de cicatrisation et les troubles de l'immunité. Il reste indispensable à la synthèse des prostaglandines et maintient la structure de certaines hormones peptidiques comme l'insuline, la gustine (goût) ou la thymuline (réponse immunitaire). Le zinc intervient dans la structure de la superoxyde dismutase (SOD), enzyme anti-oxydante.

Il est donc directement responsable de la lutte contre les radicaux libres et les troubles liés à l'âge. Fortement concentré au niveau de la rétine, il contribuerait notamment à faciliter la vision des couleurs. Le zinc participe à la synthèse des protéines dont la formation du collagène. Il contribue à embellir la peau, les ongles et les cheveux.

L'apport journalier recommandé est d'environ 15 mg. On le trouve dans beaucoup d'aliments, les plus riches étant les huîtres et les coquillages, le bœuf, la volaille, les légumineuses, les noix, les arachides et les produits laitiers.

L'absorption du zinc augmente en présence de protéines, et diminue lors d'un régime végétarien. Les phytates retrouvés dans les pains à grains entiers et les légumes peuvent causer une diminution de cette absorption par l'organisme. [87]

e) Iode

Cet oligoélément est présent dans tous les tissus, mais il est retenu en grande partie dans la thyroïde. En effet, sur les 25 à 50 mg contenus dans l'organisme, 8 mg sont concentrés dans cette glande endocrine. [90]

L'iode :

- Est nécessaire à la production des hormones thyroïdiennes T3 et T4, qui jouent un rôle très important dans la régulation du métabolisme cellulaire ;
- Intervient dans le métabolisme basal (en stimulant la consommation d'oxygène) et par conséquent dans la régulation de la température ;
- Joue un rôle dans le métabolisme des glucides, des lipides et des protéines ;
- A une action sur le système nerveux et donc sur le développement intellectuel ;
- Favorise le fonctionnement normal du cœur ;
- Favorise le développement et le fonctionnement des muscles ;

- Favorise la croissance et la maturation du squelette ;
- Est nécessaire à une bonne fertilité et stimule la lactation chez la femme allaitante ;
- A une action positive sur le système tégumentaire : peau, cheveux, ongles ;
- Favorise la mobilité gastro-intestinale et a une action sur l'activité sécrétrice des sucs digestifs. [91]

Les besoins journaliers en iode sont de l'ordre de 120 à 150 µg/j chez l'adulte et de 70 µg/j chez l'enfant.

Une alimentation normale suffit généralement à couvrir les besoins de notre organisme en iode. [92]

L'iode est essentiellement présent dans le sel marin iodé. Mais il est indispensable de se tourner vers d'autres sources riches en iode car de nouvelles recommandations préconisent de réduire l'usage du sel de table afin de diminuer les risques cardiovasculaires imputables à une surconsommation de sel (hypertension par exemple). On le trouve également dans les crustacés et les autres produits venant de la mer : les poissons de mer (morue, sardines, maquereau...), les algues, les huîtres et les coquillages....ainsi que dans l'huile de foie de morue, la viande, les œufs, les laitages et certaines céréales. L'eau minérale et les aliments tels que les poireaux, le cresson, les épinards, les haricots verts, les navets, l'oignon, l'ail, le chou, les carottes, les radis.....possèdent une teneur en iode qui varie selon la teneur en iode des sols sur lesquels on les recueille. [93]

Aliments	Teneur en iode en microgrammes
100 g de Sel Iodé	7600
100 g d'Algues	6500
100 g de Cabillaud	145
100 g d'Emmental	32
100 g de Crustacés	30
100 g de Haricots Verts	30
100 g de Yaourt Nature	20
100 g de Sardines	16
1 Œuf	7

Tableau 4 – Teneur en iode de quelques aliments. [93]

f) Cuivre

On trouve du cuivre dans un grand nombre de protéines. Au moins 20 enzymes ont une fonctionnalité dépendant du cuivre (exemples : superoxyde dismutase, cytochrome c oxydase...).

Le cuivre joue un rôle antioxydant essentiel par l'intermédiaire du superoxyde dismutase. Cette enzyme contribue à neutraliser les radicaux libres qui provoqueraient une grave destruction cellulaire. De nombreuses études chez les animaux convergent et prouvent qu'une carence en cuivre entraîne une oxydation lipidique accrue. De même, des études montrent que l'apport complémentaire de cuivre peut augmenter les défenses antioxydantes de l'organisme. Le cuivre joue semble-t-il de multiples rôles dans la santé du système nerveux central, en particulier pour le tissu cérébral. Il est nécessaire pour la formation et la préservation de la myéline, la couche de protection entourant les neurones. Des enzymes cuprodépendantes sont également nécessaires pour la synthèse des neurotransmetteurs. Beaucoup d'éléments tendent à prouver que le cuivre joue des rôles structurels et fonctionnels essentiels dans tout le système cardiovasculaire.

Il contribue aussi à la formation des globules rouges. Il aide à convertir le fer en sa forme ferrique (le plus utile) et contribue également à transporter le fer vers et à partir des tissus. Le cuivre joue aussi un rôle important dans la santé du squelette. Par l'action de la lysyle oxydase, il est essentiel à la formation du tissu conjonctif souple et solide nécessaire pour donner aux os leur solidité.

Le système immunitaire a besoin de cuivre pour accomplir plusieurs fonctions. Une carence en cuivre peut entraîner une neutropénie.

Les instances nationales et internationales ont défini des normes concernant l'apport en cuivre à des taux jugés adéquats pour conserver la santé. Aux Etats-Unis, le taux de référence de la population américaine est de 1,1 mg de cuivre par jour.

La teneur réelle en cuivre dans les aliments varie fortement en fonction de l'aliment lui-même, des conditions de culture et du type de transformation qu'il a subi. En général, les sources alimentaires les plus riches en cuivre sont :

- Les fruits de mer (en particulier les mollusques et crustacés, comme les huîtres et le crabe qui concentrent le cuivre de l'eau de mer en se nourrissant par filtration) ;
- Les abats (comme le foie) ;
- Les céréales complètes ;
- Les noix ;
- Les raisins ;
- Les légumes (haricots et lentilles) ;
- Le chocolat. [94]

Aliments	Teneur moyenne en cuivre [mg/kg]
Bœuf	1.1
Agneau	1.6
Foie de bœuf	39
Rognon de bœuf	3.7
Pommes	0.25
Bananes	0.95
Pommes de terre	0.96
Carottes	0.61
Laitue	0.72
Morue	0.19
Farine	1.5
Cacao en poudre	36.4
Lait de vache	0.06

Tableau 5 – Teneur en Cuivre de quelques aliments. [94]

g) Fluor

C'est un métalloïde bien connu pour son rôle sur l'émail dentaire et les caries. Mais ce n'est pas tout, il joue un rôle fondamental sur les tissus osseux.

Les tissus osseux sont très riches en fluor car il s'incorpore facilement aux cristaux d'hydroxy-apatite. De plus, le fluor stimule la synthèse du collagène, permettant la réparation des fractures. Pour soigner l'ostéoporose, la thérapeutique à base de fluor a été abandonnée car dangereuse et mal tolérée, et surtout supplantée par d'autres médicaments.

L'émail dentaire contient environ 0,001 % de fluor sous forme de fluoro-apatite. Différents travaux ont montré l'action bénéfique du fluor sur la carie dentaire. Elle s'effectue par contact et ne nécessite pas le passage du fluor dans le sang, ce qui explique l'intérêt des dentifrices fluorés. Il est très important que cet apport ne soit pas surdosé pour éviter un risque de fluorose locale ou générale. Chez l'enfant, tout supplément fluoré doit se faire sous contrôle médical. La plupart du temps, l'apport fluoré alimentaire étant suffisant, l'utilisation de dentifrices fluorés suffit amplement.

Certaines eaux minérales (sources de Vichy), les poissons, les algues, le thé, la bière, certains légumes (épinards, carottes, asperges) contiennent du fluor.

Le fluor est potentiellement toxique à la dose de 0,1 mg/kg/j. Pour des doses supérieures à 1 mg/kg/j, il y a des risques de fluorose :

- Soit locale : c'est la *fluorose dentaire* avec apparition de taches blanches sur les dents, dites « dents de porcelaine ». Elles se transforment en caries.
- Soit générale : *fluorose osseuse*, provoquant une modification de la structure des os rendus fragiles et cassants. À la longue, possibilité de raideurs, calcifications, invalidité. Cette forme ne s'observe plus, le traitement au fluor au long cours ayant été abandonné dans l'ostéoporose. [95]

3. Macroéléments

a) *Le calcium*

Il s'agit du minéral le plus abondant dans l'organisme. Le corps en contient en effet 1 000 à 1 500 g, dont 99 % se trouvent dans le squelette et les dents. Il est absorbé dans l'intestin en présence de vitamine D. Le magnésium participe également à la répartition du calcium dans les tissus, l'excédent étant éliminé dans les fèces.

Le calcium intervient dans la formation de l'os et des dents, dont il assure la croissance, la solidité et l'entretien. Il est essentiellement présent au niveau extracellulaire et sa concentration est régulée par la parathormone (PTH) et, à moindre mesure, par la calcitonine et la vitamine D. Le calcium sous forme d'ions Ca^{2+} intervient dans la coagulation sanguine. Il assure la perméabilité des membranes, la transmission des influx nerveux, la contraction musculaire et un rythme cardiaque normal. Il n'est réellement efficace que dans un rapport précis avec le phosphore et le magnésium, raison pour laquelle il est souvent prescrit sous forme de phosphate tricalcique. Le rapport doit être de deux fois le calcium pour une fois le phosphore et le magnésium.

Les apports journaliers recommandés sont de 1 200 à 1 500 mg pour un adulte. Le calcium est surtout apporté par les laitages, bien que le lait contienne trop de phosphore (déséquilibre) entraînant ainsi une calcification insuffisante. Les fromages à pâte cuite (parmesan, emmental, gruyère, roquefort...) sont les plus riches en calcium. Certaines eaux minérales sont également très riches (Hépar®, Contrex®...), ainsi que l'eau du robinet. Les amandes, les noisettes, le persil, les figues, le cresson, le soja, le pissenlit, les épinards, les escargots, les bigorneaux et les jaunes d'œufs sont également des sources non négligeables.

b) Le chlore

L'organisme en contient environ 74 g où il n'existe quasiment que sous forme d'ions chlorure (Cl⁻). Les concentrations les plus élevées se trouvent dans le liquide cérébro-spinal et dans le suc gastrique (formation d'acide chlorhydrique).

Avec le sodium et le potassium, il participe à la répartition de l'eau dans l'organisme, et contribue au maintien de la pression osmotique et de l'équilibre acido-basique.

L'apport journalier recommandé est de 3 à 9 g. On le trouve principalement dans le sel de table, sous forme de chlorure de sodium, et dans la plupart des aliments comme les olives, les huîtres, le pain complet, les foies de volaille ou le maquereau.

c) Le magnésium

L'organisme en contient environ 25 g. Comme la vitamine C, « vedette des vitamines », le magnésium est la « vedette des minéraux ». En effet, il participe à de nombreuses réactions métaboliques dans le corps, c'est un activateur enzymatique. Il agit également en étroite collaboration avec le sodium, le potassium et le calcium, avec lesquels il doit rester en équilibre dans l'organisme. Il joue un rôle important dans la production d'énergie, ainsi que dans la perméabilité cellulaire. Il intervient dans l'immunité et permet notamment une meilleure résistance au froid. Il contribue, enfin, à la transmission de l'influx nerveux et à la relaxation musculaire, en détendant les muscles (aussi bien ceux du squelette que ceux des vaisseaux sanguins et du tractus gastro-intestinal). Il est donc utilisé pour lutter contre les crampes. Le magnésium possède une action neuropsychique permettant de lutter contre la fatigue, la nervosité, l'anxiété, l'insomnie, la dépression et le stress (notamment les étudiants en période d'examens). Au niveau ostéo-articulaire, il exerce une activité de type vitamine D et intervient ainsi dans l'ossification en régularisant l'équilibre phosphocalcique. Le magnésium est également un bon protecteur cardiovasculaire avec un effet hypotenseur léger.

L'apport journalier recommandé est en moyenne de 350 mg pour un adulte ; un régime équilibré devant couvrir les besoins quotidiens. Il est présent dans l'eau de mer (magnésium marin), les algues marines, le sel marin non raffiné, les bigorneaux, certaines eaux minérales (Hépar®, Badoit®, Contrex®), le lait et les produits laitiers, le cacao, les céréales complètes (germes de blé, pain complet, flocons d'avoine), les légumineuses, la levure de bière et les légumes verts (bettes, épinards).

d) Le phosphore

Le phosphore existe sous forme de phosphates, notamment de calcium, de potassium ou de sodium.

Le phosphore intervient, en association avec le calcium, dans la calcification osseuse. Il constitue en effet, avec le calcium et le magnésium, la trame minérale de l'os. Son absorption est facilitée par la vitamine D. Il entre également dans la composition des dents. Composant essentiel des cellules et des membranes (sous forme de phospholipides au niveau du cerveau notamment), il est utilisé dans les états de fatigue, notamment avec retentissement cérébral, c'est-à-dire baisse de concentration et de mémoire.

Il intervient également dans de nombreuses réactions enzymatiques, ainsi que dans la fourniture et le stockage de l'énergie (composant de l'ATP). Il est présent dans les nucléotides et les acides nucléiques. Il exerce une action régulatrice sur l'excitabilité neuromusculaire et se trouve donc indiqué dans les spasmes intestinaux, musculaires ou respiratoires, et les manifestations spasmophiliques en association avec le manganèse, le magnésium et le cobalt.

Les apports nutritionnels recommandés sont en moyenne de 700 mg par jour. Les aliments riches en protéines (viandes, volailles, poissons, œufs), les produits laitiers (fromage, lait, yaourts), les fruits secs (noix, graines) et les produits céréaliers constituent les principales sources de phosphore.

e) Le potassium

Le potassium est largement concentré dans les muscles qui constituent le principal « réservoir ». C'est également le cation intracellulaire le plus important. Il existe un gradient de concentration en faveur de la sortie de l'ion depuis le compartiment intracellulaire vers le compartiment extracellulaire. Ce gradient, est entretenu par des pompes situées dans les membranes cellulaires, en particulier la pompe Na^+/K^+ . En effet, le potassium travaille en étroite collaboration avec le sodium pour maintenir l'équilibre acido-basique.

Une alimentation variée couvre les besoins journaliers car le potassium est très présent, notamment dans les fruits (fruits secs, bananes...), les légumes frais, les pommes de terre, les lentilles, les artichauts, les céréales et les légumineuses. Il se trouve également dans certaines boissons comme le thé et le chocolat.

f) Le sodium

Le sodium est un métal alcalin présent dans tout l'organisme qui en contient environ 100 g.

Électrolyte majeur, le sodium est surtout présent dans les liquides extracellulaires où il joue un rôle fondamental dans la pression osmotique extracellulaire. En collaboration avec d'autres ions (notamment le bicarbonate), il participe à l'équilibre acido-basique en maintenant un pH sanguin stable. Il intervient dans la transmission de l'influx nerveux et la contraction musculaire. Il entre également dans la composition de la pompe Na^+/K^+ , assurant le transport du glucose et des nutriments à l'intérieur de la cellule.

Les besoins quotidiens en chlorure de sodium (NaCl) sont de 2 à 4 g/j. Il faut savoir que 1 g de chlorure de sodium contient 400 mg de sodium. Les aliments les plus riches en sodium sont le bœuf salé déshydraté, le sel de table, le bacon, les cornichons, le jambon, la sauce soja, les légumineuses en conserve, le hareng, le saumon fumé, les anchois et les sardines.

g) Le soufre

Le soufre est présent dans toutes les cellules. Il intervient notamment dans la structure des protéines et la respiration cellulaire. Il entre également dans la composition d'acides aminés essentiels (méthionine, cystine, taurine), de certaines vitamines (thiamine ou vitamine B1, biotine ou vitamine B6) et du coenzyme A qui intervient dans de nombreux métabolismes.

Le soufre est nécessaire à la constitution des os, des tendons et des articulations. Il est donc utilisé pour soulager les affections rhumatismales (arthrites et arthroses). Dans le tissu osseux, il constitue, avec les brins de collagène, une trame sur laquelle le calcium, le phosphore et le magnésium pourront être déposés. De plus, il participe à l'élimination des toxines et il est particulièrement utilisé pour ses propriétés détoxifiantes et dépuratives du foie. Il régule ainsi les sécrétions hépatobiliaires. Par ailleurs, il aide à lutter contre les affections respiratoires (asthme, bronchites, laryngites chroniques, rhinopharyngites...) et possède des propriétés antiallergiques. Enfin, le soufre a des vertus reconnues sur la santé de la peau, des ongles et des cheveux. Il est utilisé dans le traitement de l'eczéma, des urticaires, des démangeaisons et du psoriasis.

Il n'y a pas véritablement d'apport journalier recommandé car on estime qu'une alimentation équilibrée permet de couvrir correctement les besoins journaliers en soufre. Toutefois, l'apport journalier en acides aminés soufrés est estimé à 13-14 mg par kg de poids. Les aliments les plus riches en soufre sont les fruits de mer, les poissons, les crustacés, les algues, les viandes, le jaune d'œuf, les lentilles, les haricots secs, les oignons, l'ail, les fruits oléagineux, la moutarde et le soja. Il est présent dans de nombreuses eaux thermales aux effluves caractéristiques. Certaines eaux minérales en sont riches (Hépar®, Contrex®). [96]

VI. L'eau

1. Généralités

L'eau est le principal constituant du corps car environ 60 % du poids d'un adulte est représenté par de l'eau. Chez les nourrissons et les enfants, le pourcentage de l'eau corporelle est plus élevé que chez les adultes. Cela est dû au contenu en eau important du compartiment extracellulaire, alors que le contenu en eau du compartiment intracellulaire est plus faible chez les nourrissons et les jeunes enfants que chez les adultes. La composition corporelle change rapidement au cours de la première année de vie avec une diminution du contenu en eau de la masse maigre et une augmentation de la concentration des tissus en protéines.

Chez l'adulte, environ deux tiers de l'eau totale se trouve dans le compartiment *intracellulaire* et un tiers dans le compartiment *extracellulaire*. Un homme de 70 kg a environ 42 L d'eau totale, 28 L d'eau intracellulaire et 14 L d'eau extracellulaire. Le milieu extracellulaire se compose de 3 L d'eau dans le sang, 1 L de liquide transcellulaire (liquides céphalorachidien, intraoculaire, pleural, péritonéal et synovial) et 10 L de liquide interstitiel, ce dernier incluant la lymphe qui constitue un milieu aqueux entourant les cellules.

La constance de la quantité et de la composition du milieu extracellulaire est une nécessité pour le fonctionnement des cellules. Cette constance est due à des mécanismes homéostatiques qui contrôlent et qui régulent sa composition, sa pression osmotique, son pH et sa température. Ces mécanismes mettent en œuvre tous les systèmes de l'organisme, tels les systèmes respiratoire, circulatoire, gastro-intestinal et les reins. Le contrôle et la régulation de ces systèmes sont coordonnés par les systèmes nerveux et endocrinien.

La composition du liquide intracellulaire est maintenue par des mouvements de solutés à travers la membrane cellulaire par des transports passifs et actifs.

Dans des conditions de climat ambiant tempéré (18-20°C) et d'activité physique modérée, l'eau corporelle est relativement constante. C'est le résultat d'une régulation précise de l'équilibre hydrique, de l'ordre de 0,2 % du poids corporel au cours d'une période de 24 heures où les apports et les pertes d'eau doivent être égaux.

2. Balance hydrique

a) Entrées d'eau

Les apports d'eau proviennent de trois sources principales : l'eau des boissons, l'eau des aliments et l'eau produite par le métabolisme.

L'eau que nous ingérons via la nourriture provient de nombreux aliments dont les contenus en eau varient de 40 à 80 %. L'eau produite par le métabolisme (eau endogène ou métabolique) provient des oxydations des macronutriments. La contribution des aliments aux apports hydriques est de 20 à 30 %, celle des boissons est de 70 à 80 %. Ces pourcentages dépendent beaucoup du type d'aliments consommés et du choix des boissons. Pour un adulte au repos vivant en climat tempéré (18-20°C), la quantité d'eau qui doit être bue est en moyenne de 1,5 L par jour.

Cet apport hydrique doit cependant être adapté en fonction de l'âge, du sexe, du climat et de l'activité physique. La quantité d'eau provenant des aliments varie beaucoup et représente un apport hydrique de 0,5 à 1 L par jour. L'eau endogène ou métabolique représente environ 250 à 350 mL par jour chez des individus sédentaires.

L'apport total d'eau recommandé (boissons et aliments) pour des adultes sédentaires est en moyenne compris entre 2 et 2,5 L par jour (femmes et hommes respectivement). En résumé, le total des entrées d'eau pour des adultes sédentaires est en moyenne de 2 à 3 L par jour.

b) Sorties d'eau

Les voies principales de pertes d'eau sont les reins, la peau et le système respiratoire. Les pertes par le système digestif sont, en revanche, minimales. En 24 heures, un adulte sédentaire produit 1 à 2 L d'urine. L'eau perdue par évaporation à travers la peau est appelée la perspiration insensible, car c'est une perte d'eau invisible qui est d'environ 450 ml par jour en situation de climat tempéré. L'eau perdue par évaporation par le système respiratoire

représente 250 à 350 mL par jour. Enfin, l'eau perdue dans les matières fécales est d'environ 200 mL par jour. En moyenne, un adulte sédentaire perd 2 à 3 L d'eau par jour. Les pertes d'eau par la peau et les poumons dépendent en outre du climat, de la température et de l'humidité relative de l'air et de l'activité physique. Lorsque la température corporelle interne augmente, le seul mécanisme permettant d'accroître les pertes de chaleur est la stimulation des glandes sudoripares.

L'évaporation de l'eau via la sueur à la surface de la peau est un mécanisme très efficace pour soustraire de la chaleur au corps : 2,2 kJ sont utilisés pour évaporer 1 g d'eau.

Lors d'un exercice musculaire effectué à une température ambiante élevée, le débit de sueur total peut atteindre 1 à 2 L par heure. Cette perte d'eau peut entraîner la déshydratation et l'hyperosmolarité du liquide extracellulaire. Il est important de souligner que la sueur est toujours hypotonique par rapport au plasma ou au liquide extracellulaire.

La sueur contient 20 à 50 mmol/L de Na^+ alors que la concentration du Na^+ extracellulaire est de 150 mmol/l. Une sudation intense entraîne donc des pertes d'eau plus importantes que les pertes de Na^+ . Il s'ensuit une augmentation de l'osmolarité extracellulaire qui attire l'eau à partir des cellules dans le liquide extracellulaire.

Ainsi, la perte d'eau induite par la sudation concerne les milieux intra- et extracellulaires, une situation qui caractérise la déshydratation hypertonique. La nécessité de boire des liquides hypotoniques pendant l'exercice d'endurance est bien établie. Une personne ayant perdu 4 L de sueur sans boire de l'eau présente une diminution d'environ 10 % de l'eau corporelle, mais seulement de 4 % du Na^+ extracellulaire (environ 120 mmol de Na^+). Cela montre que pendant l'exercice, le remplacement de liquide est plus important que le remplacement du sel.

La déshydratation et l'hyperosmolarité du liquide extracellulaire peuvent affecter l'état de conscience et sont des facteurs responsables du « coup de chaleur » qui se produit lors d'hyperthermie survenant au cours d'un exercice musculaire prolongé effectué à température ambiante et humidité relative élevées. [97]

3. Rôles de l'eau

L'eau est un nutriment remarquable et omniprésent. Sans l'eau, la mort survient en quelques jours. Dans l'organisme, l'eau sert de moyen de transport et de milieu réactionnel ;

la diffusion des gaz n'est souvent possible qu'à travers des surfaces imprégnées d'eau. Les nutriments et les gaz voyagent en solution aqueuse ; les déchets quittent l'organisme avec l'eau contenue dans les urines et les selles. L'eau en synergie avec différentes protéines, lubrifie les articulations et protège divers organes « mobiles » comme le cœur, les poumons, les intestins et les yeux. Grâce à son caractère incompressible, l'eau donne sa structure et sa forme au corps par l'augmentation de volume qu'elle produit dans les tissus de l'organisme. L'eau a de formidables qualités thermostatiques car elle est capable d'absorber des quantités de chaleur considérables sans augmentation importante de la température. Cette qualité, associée à une température de vaporisation élevée, participe au maintien d'une température relativement constante malgré les contraintes thermiques extérieures et l'augmentation significative de la chaleur interne produite au cours de l'effort. [98]

VII. Composition des aliments

Des méthodes analytiques, pratiquées dans des laboratoires spécialisés, sur un échantillonnage d'un très grand nombre d'aliments de consommation courante, ont permis de regrouper les aliments en fonction de leurs caractéristiques nutritionnelles :

- Groupe 1 : lait et produits laitiers ;
- Groupe 2 : viandes, poissons et œufs ;
- Groupe 3 : corps gras ;
- Groupe 4 : céréales, produits céréaliers et légumes secs ;
- Groupe 5 : fruits et légumes ;
- Groupe 6 : sucre et produits sucrés ;
- Groupe 7 : boissons.

Il existe de nombreuses tables de composition des aliments. La table officielle et actuellement disponible en France est le REGAL (répertoire général des aliments) qui utilise une banque de données développée par le CIQUAL (centre informatique sur la qualité des aliments).

La connaissance de la composition caractérisant chaque groupe d'aliments permet d'établir des équivalences nutritionnelles entre les aliments. C'est aussi la base des enquêtes alimentaires.

1. Groupe 1 : lait et produits laitiers (yaourts, fromages...)

Ce sont des aliments complets dits « de construction » ou « bâtisseurs », puisqu'ils fournissent les trois nutriments énergétiques : protéines, lipides, glucides, du calcium et certaines vitamines liposolubles A et D. Ce sont des aliments irremplaçables. Ils n'ont pas d'équivalents. De plus, ils sont indispensables tout au long de la vie (le lait maternel ou le lait pour nourrisson est le premier et seul aliment consommé pendant les 3 à 4 premiers mois de la vie. Ultérieurement, il peut être remplacé par divers substituts lactés qui sont en général d'origine bovine.)

2. Groupe 2 : viandes, poissons et œufs

Ce sont des aliments de construction comme le lait et les produits laitiers. Ils constituent une source importante de protéines, de lipides et de fer, mais ils n'apportent pratiquement pas de glucides. Au plan des protéines, ils peuvent être remplacés par le lait et les produits laitiers, l'inverse n'est pas possible car ces sources protéiques sont relativement pauvres en calcium.

- *Equivalences protéiques*

La viande, le poisson et les œufs, présentent le même intérêt nutritionnel pour ce qui est de l'apport en protéines et peuvent se remplacer entre eux. On trouve autant de protéines, soit 16 à 20 g de protéines d'origine animale, dans les portions suivantes :

100 g de viande = 100 g de volaille = 100 g de poisson = 2 œufs

Occasionnellement, le lait et les produits laitiers, peuvent les remplacer, compte tenu des équivalences que l'on peut établir. Ainsi, 16 à 20 g de protéines d'origine animale sont apportées également par :

500 mL de lait = 200 g de fromage blanc = 4 yaourts = 90 g de camembert.

3. Groupe 3 : les corps gras

Les corps gras sont des aliments qui ont subi une préparation pour séparer la partie grasse de l'aliment naturel (lait, viandes, graines oléagineuses).

Ils sont essentiellement constitués de lipides et représentent la partie « visible » des lipides alimentaires.

A côté de leur valeur calorique, un grand nombre apportent des acides gras essentiels et/ou certaines vitamines liposolubles

Des proportions relatives des divers types d'acides gras (saturés, mono-insaturés, polyinsaturés), dépendent des caractéristiques physicochimiques des corps gras).

Les corps gras alimentaires comprennent les huiles et graisses d'origine végétale ou animale, les beurres et les margarines.

Les huiles se différencient des graisses par leur point de fusion : à 20 °C, les huiles sont liquides, les graisses sont plus ou moins solides.

- *Equivalences lipidiques*

Les corps gras n'apportent pratiquement que des lipides purs d'origine végétale. Les produits laitiers ainsi que la viande et la charcuterie reflètent la répartition tissulaire plus complexe des lipides d'origine animale. Ainsi 10 g de lipides sont apportés par :

- 10 g d'huile ou 12,5 g de beurre ou 12,5 g de crème ;
- 100 g de viande ou 30 g de saucisson ou 35 g d'emmental.

4. Groupe 4 : céréales, produits céréaliers et légumes secs

Ce groupe comprend les céréales (riz, maïs, avoine, blé, seigle) et leurs nombreux dérivés : (farines, pains, pâtes alimentaires...) ainsi que les légumes secs.

Ce sont essentiellement des sources de glucides complexes, en particulier sous forme d'amidon, responsables d'un apport calorique élevé. Ces aliments amylacés apportent également des protéines d'origine végétale, des vitamines du groupe B et des fibres alimentaires.

- *Equivalences caloriques*

Au plan énergétique, les aliments amylacés du groupe 4 peuvent se remplacer entre eux. On a autant de calories, soit 270 kcal, en consommant chacune des portions d'aliments suivants :

100 g de pain ou 70 g de biscottes ou 50 g de biscuits ou 200 g de riz ou de pâtes (poids cuit).

- *Equivalences glucidiques*

Il y a autant de glucides, soit 40 g dans :

- 75 g de pain ;
- Ou 50 g de farine ;
- Ou 50 g de biscottes (5 à 6 biscottes) ;

- Ou 200 g de pâtes (poids cuit)
- Ou 200 g de riz (poids cuit) ;
- Ou 250 g de légumes secs (poids cuit).

- *Equivalences protéiques*

Les aliments du groupe 4 peuvent remplacer ceux des groupes 1 et 2, compte tenu des équivalences en protéines que l'on peut établir. Ainsi, 16 à 20 g de protéines d'origine animale ou d'origine végétale sont apportées par :

- 100 g de viande ou poisson ou 60 g d'emmental ou 500 mL de lait ;
- 200 g de légumes secs (poids cuits) ou 700 g de riz (poids cuit) ou 200 g de pain.

L'apport en protéines d'origine végétale des aliments du groupe 4 peut être complété par d'autres aliments des groupes 1 et 2. Ainsi, 16 à 20 g de protéines sont apportées par : 250 mL de lait + 100 g de pain ou 100 g de viande.

5. Groupe 5 : fruits et légumes

Il s'agit d'aliments végétaux caractérisés par une très grande disparité botanique et nutritionnelle.

Du point de vue nutritionnel, ils ont cependant en commun une relative richesse en eau, en fibres alimentaires, en sels minéraux, en oligoéléments, en vitamines et une relative pauvreté en macronutriments. Dans ce groupe, la distinction entre aliments crus et cuits est importante car la cuisson modifie leur composition et donc leur valeur nutritionnelle. D'autre part, de nombreux facteurs interviennent sur la composition de ces aliments : facteurs génétiques (variétés), facteurs physiologiques (âge), environnement (caractéristiques biologiques, géologiques et conditions météorologiques).

Consommés crus, les végétaux conservent toute leur valeur nutritionnelle. La teneur en eau est très élevée, 75 à 90 g/100 g dans les fruits et 80 à 95 g/100 g dans les légumes. La teneur en protéine est faible, allant de 0,2 à 0,3 g/100 g. Mais leurs protéines sont de meilleure valeur biologique que celles des céréales. La teneur en lipides est inférieure à 1 g/100 g. Les glucides sont principalement sous forme de mono- et disaccharides, en particulier de fructose libre mais aussi de saccharose, de glucose et de sorbitol. L'amidon est absent ou à l'état de traces. Dans les fruits, la teneur en glucides est variable selon les espèces et selon leur stade de maturation. Elle est la plus faible dans les baies (5 g/100 g pour les groseilles) et dans les

agrumes (pamplemousses 5,9 g/100 g). Elle est de 10 à 13 g/100 g dans les fruits à noyaux (pêches, abricots...) et les fruits à pépins.

Dans les légumes, la teneur varie peu : de 1 à 7 g/100 g (ex : épinards : 0,8 g/100 g, carottes : 6,7 g/100g).

Tous les fruits et certains légumes (salades, tomates, concombres, carottes...) peuvent être consommés crus. Leur valeur nutritionnelle, essentiellement vitaminique, est basée sur leur état de fraîcheur et à tendance à se dégrader depuis leur récolte jusqu'à leur consommation. La vitamine C très thermosensible et très oxydable, peut servir de marqueur de fraîcheur. Les autres légumes (épinards, haricots verts, pommes de terre...) doivent subir une cuisson pour être consommable, entraînant une altération de leur valeur nutritionnelle, vitaminique et minérale.

D'une part, la chaleur détruit partiellement les vitamines. Le β -carotène est peu diminué, les vitamines du groupe B le sont davantage, la vitamine C l'est en proportions importantes selon le mode et le temps de cuisson.

D'autre part, l'eau de cuisson entraîne le passage par diffusion des sels minéraux et des vitamines hydrosolubles. Les légumes, après cuisson, gardent néanmoins une valeur nutritionnelle intéressante. En moyenne, 50 % de la vitamine C et 80 % de la vitamine B1 sont conservés dans les légumes cuits par les procédés usuels. Une proportion suffisante de minéraux reste dans les légumes cuits.

- *Cas particuliers*

- ✓ La pomme de terre

La pomme de terre est un tubercule dont les teneurs en eau, en lipides (0,2 g/100 g), et en protéines (2,1 g/ 100 g) sont proches de celles des autres légumes. Par contre, la teneur en amidon (environ 15,2 g/100 g) est nettement plus élevée que celle de la plupart des légumes. La valeur calorique est donc plus élevée (72 kcal/100 g) contrastant avec sa teneur en protéines, beaucoup plus faible que celle des céréales (7 à 12 g/100 g), du pain (7 g/100 g) ou de légumes secs (21 g/100 g).

La teneur en lipides et donc la valeur calorique de la pomme de terre dépend de son mode de préparation culinaire, cuite à l'eau ou au four : 0,1 g/100 g, cuite dans l'huile : 15 g/100 g, et dans les préparations industrielles sous formes de chips : 36 g/100 g.

Elle se distingue de la plupart des autres légumes par sa faible teneur en calcium. La quantité de vitamine C est assez élevée lors de la récolte, de l'ordre de 17 mg / 100 g, mais elle baisse progressivement au cours du stockage, les pertes pouvant atteindre 30 %. De plus, la cuisson, dans l'eau ou dans l'huile, entraîne des pertes importantes.

✓ La châtaigne

La châtaigne se distingue nettement de la plupart des autres fruits. Son amande est très riche en glucides, en particulier en amidon : 36 à 40 g/100 g, ce qui lui confère une valeur calorique élevée de l'ordre de 190 kcal / 100 g.

La teneur en protéines est de 2 à 3 g/ 100 g.

La teneur en vitamine C est beaucoup plus faible que celle de la plupart des fruits.

✓ La banane

La banane est un fruit riche en glucides (21 g /100g). C'est un aliment énergétique (89 kcal/100 g). Sa caractéristique réside dans sa composition glucidique qui évolue au cours du mûrissement (à l'état d'amidon dans la banane verte et sous forme de sucres simples dans la banane bien mûre).

✓ Les fruits séchés

Les fruits séchés sont obtenus par déshydratation des fruits frais (abricots, raisins, prunes, dattes, figes...). La teneur en eau est inférieure à 25 % et les glucides représentent jusqu'à 80 % du poids. Il en résulte une valeur calorique élevée.

✓ Les fruits oléagineux

Les fruits oléagineux frais sont caractérisés par une teneur élevée en lipides : 12,5 g/100 g dans l'olive verte, 30 g/100 g dans l'olive noire, 14 g/100 g dans l'avocat.

Les fruits oléagineux secs sont des graines (noix, noisette, cacahuète, amande ...) et leur teneur en eau est beaucoup plus faible que dans les autres fruits : 5 à 22 g/100 g. Par contre, ils sont plus riches en nutriments : 5 à 15 g/100 g de glucides, 3,5 à 15 g/100 g de fibres alimentaires, 8 à 25 g/100 g de protéines, plus de 50 g/100 g de lipides, constitués d'acides gras insaturés. Leur valeur calorique moyenne est de 400 kcal/100 g.

6. Groupe 6 : sucre et produits sucrés

Ce sont des aliments riches en calories contenant essentiellement des glucides rapides, constitués de glucose et de saccharose.

- *Le sucre*

Le sucre ou « sucre blanc » est le saccharose purifié à 98,5 % et cristallisé à partir de betteraves ou de cannes à sucre. Il a une valeur calorique de 394 kcal/ 100 g.

Le « sucre roux » est moins raffiné que le sucre blanc. Il contient moins de 98 % de saccharose et de faibles quantités de sels minéraux et de vitamines du groupe B. il a une valeur calorique de 284 kcal/100 g. Il est caractérisé par une richesse relative en chrome (Cr).

- *Les confitures*

Les confitures sont fabriquées à partir d'une quantité égale de saccharose et de fruits. La valeur nutritionnelle des confitures varie selon la nature des fruits : le saccharose est le principal nutriment (60 à 65 g/100 g), responsable de la valeur calorique de 260 à 285 kcal/ 100 g. Les confitures contiennent de faibles quantités de protéines, de lipides et de sels minéraux. Parmi les vitamines, on identifie le β -carotène et la vitamine C.

- *Le miel*

La dénomination « miel » s'applique au produit sucré constitué par le nectar des plantes, recueilli, transformé et emmagasiné dans les rayons de la ruche par les abeilles. Le miel renferme 76 g/100 g de glucides, constitués de glucose et de fructose provenant de la transformation du saccharose par une enzyme, l'invertase, présente dans les jabots des abeilles. Les teneurs en protéines, en lipides, en sels minéraux et en vitamines sont faibles.

- *Le chocolat*

Le chocolat est un mélange de sucre et de pâte de cacao subissant différents stades de dégraissage, additionné ou non de beurre de cacao et selon les cas de lait, d'arômes ou de fruits. La valeur calorique est en moyenne de 500 kcal/100 g. Sa valeur nutritionnelle varie selon les qualités mais en moyenne apporte des glucides (60 à 64 g/100 g), des protéines (2 à 6 g/100 g), des lipides (24 à 34 g/100 g), des sels minéraux en quantité importantes (calcium, potassium, magnésium), vitamine E, β -carotène, vitamines du groupe B, Fer.

- *Les confiseries*

Les confiseries sont des produits sucrés élaborés à partir de mono- et disaccharides (saccharose et glucose), auxquels sont ajoutés d'autres constituants (miel, lait, matières grasses, fruits, céréales...), arômes et colorants naturels ou synthétiques. La valeur calorique de chaque produit est très variable selon la nature et la proportion des ingrédients.

7. Groupe 7 : boissons

Les boissons sont des solutions apportant essentiellement de l'eau et divers sels minéraux et oligo-éléments à des concentrations variées.

- *L'eau*

La composition de l'eau de boisson comporte des différences notables en sels minéraux selon son origine (sources, puits, nappes souterraines, rivières...)

- *Les boissons chaudes (café, thé, tisanes, infusions)*
- *Les jus de fruits et dérivés*
- *Les boissons alcoolisées (vin, cidre, bière, boissons distillées, liqueurs ...)*

La connaissance de la composition des aliments, classés en sept groupes selon leurs ingrédients principaux permet d'appliquer les règles élémentaires et fondamentales de la nutrition diététique : variété et équilibre alimentaire obtenus en choisissant chaque jour des aliments des sept groupes en quantité suffisante pour satisfaire les besoins nutritionnels de l'homme. [99]

VIII. La pyramide alimentaire suisse

La pyramide alimentaire suisse présente en image une alimentation équilibrée. Les aliments des étages inférieurs sont nécessaires en plus grande quantité, alors que ceux des étages supérieurs suffisent en moindre quantité. Une alimentation saine ne nécessite aucun interdit. Elle résulte simplement de la combinaison des aliments dans une juste proportion. Choisir des aliments variés de chacun des groupes d'aliments et les préparer avec ménagement assure un apport optimal de substances nutritives et protectrices indispensables.



Figure 39 – La pyramide alimentaire suisse. [100]

1. Les boissons

a) Quelles boissons ?

- L'eau potable du réseau
- L'eau minérale
- Les tisanes de fruits ou d'herbes (non sucrées)
- Le café, le thé noir, le thé vert (avec modération)

Le lait, les boissons lactées, les jus, les limonades, les thés froids, les boissons énergétiques, les sirops, les boissons « light/zero » et les boissons alcoolisées ne sont pas classés à l'étage des boissons dans la pyramide alimentaire suisse. Ces boissons ne sont pas seulement des fournisseurs d'eau, mais aussi d'énergie (calories), de divers nutriments (sucre, graisse, protéines, vitamines, alcool par exemple) et parfois d'acides néfastes pour l'émail dentaire...

b) Quoi et combien ?

Boire 1 à 2 litres par jour, de préférence sous forme de boissons non sucrées telles que l'eau du robinet, l'eau minérale ou les tisanes aux fruits ou aux herbes. Les boissons contenant de la caféine telles que le café, le thé noir et le thé vert contribuent aussi à l'hydratation.

c) Pourquoi ?

Les boissons hydratent le corps, lui apportent des sels minéraux importants (par exemple : le calcium) et étanchent la soif. L'organisme utilise l'eau pour constituer ses cellules, pour le transport de substances (sang) et pour le maintien de la température corporelle (transpiration).

d) Conseils

- ✓ Boire régulièrement de l'eau tout au long de la journée, pendant et en dehors des repas.
- ✓ La consommation des boissons light ou zéro doit être occasionnelle. Elles sont pauvres en énergie mais entretiennent une préférence pour des saveurs sucrées marquées et contiennent des acides néfastes pour les dents.

2. Légumes et fruits

a) Quels aliments ?

- Les légumes, la salade, les fruits (frais)
- Les jus de légumes et de fruits (sans adjonction de sucre)
- Les légumes et fruits de longue conservation [surgelés, séchés (par ex haricots verts secs, fruits secs), en conserve, au vinaigre, ...]
- Les champignons

b) Quoi et combien ?

Consommer 5 portions par jour, de couleurs variées, dont 3 portions de légumes et 2 portions de fruits. 1 portion correspond à 120 g. Il est possible de remplacer chaque jour une portion par 2 dL de jus de fruits ou de légumes sans sucre ajouté.

c) La portion

Une portion (120 g) ne doit pas être pesée, mais peut facilement être mesurée à l'aide des mains. Pour les fruits et les légumes tels que la pomme ou la tomate, une portion correspond à la quantité pouvant être contenue dans une main. Pour les légumes découpés ou surgelés, pour la salade et les petits fruits, les deux mains mises côte à côte pour former un bol donnent une portion (par ex. : petits pois, brocoli, cerises, baies).

d) Pourquoi ?

Les légumes et les fruits sont une source importante de vitamines, de sels minéraux, de fibres alimentaires et de substances végétales secondaires. Chaque fruit ou légume présente un spectre différent de substances nutritives. Plus la consommation de fruits et légumes est diversifiée avec les couleurs et les modes de préparation (crus, cuits) variés, plus l'alimentation est capable de fournir la grande diversité de substances nutritives dont l'organisme a besoin.

e) Conseils

- ✓ Goûtez à la diversité et essayez même des variétés que vous ne connaissez pas.
- ✓ Dès que des fruits et légumes sont disponibles, n'hésitez pas à vous servir.
- ✓ En complément des produits frais, il est profitable d'avoir un stock de fruits et légumes surgelés, secs et en conserve.
- ✓ Les légumes ne sont pas seulement bons comme accompagnement, mais aussi en salade, en soupe, en potée, en gratin, en tarte aux légumes...
- ✓ Servez-vous d'une grande portion de légumes. Même à la cantine et au restaurant, demandez que l'on vous serve une grande portion.
- ✓ Emportez des fruits au travail et mangez-en pour une collation ou un dessert.

3. Produits céréaliers, pommes de terre et légumineuses

a) Quels aliments ?

- Les céréales et produits céréaliers (pain, farine, pâtes, semoule de couscous, boulgour, polenta...)
- Les pommes de terre, la patate douce, le manioc
- Le riz, les galettes de riz (non sucrées)
- Les légumineuses (lentilles, pois chiche, haricots blancs, haricots Borlotti, haricots rouges, haricots mungo, soja)
- Autres aliments farineux (l'amarante, le quinoa...)

b) Quoi et combien ?

Consommer 3 portions par jour. Choisir les produits céréaliers de préférence complets. 1 portion correspond à 75-125 g de pain / pâte (par exemple : pâte à pizza) ou 60-100 g de légumineuses (poids sec) ou 180-300 g de pommes de terre ou 45-75 g de biscottes (pain

croustillant) / crackers au blé complet / flocons de céréales / farine / pâtes / riz / maïs / autres céréales (poids sec).

c) La portion

La grandeur d'une portion est déterminée en fonction des besoins énergétiques, qui dépendent entre autres de la taille, du sexe, de l'âge et de l'activité physique. Les personnes qui ne sont pas très grandes et celles qui sont plutôt sédentaires ont plutôt besoin des portions les plus petites indiquées dans les recommandations de la pyramide alimentaire. Les personnes de grande taille et de surcroît actives ont elles besoin des portions les plus importantes.

d) Pourquoi ?

Les aliments de ce groupe fournissent principalement des glucides sous forme d'amidon. Ils sont ainsi une source importante d'énergie pour les muscles, le cerveau et d'autres organes. Ils fournissent en outre des vitamines, des sels minéraux et des fibres alimentaires. Ces derniers sont contenus en quantité plus importante dans les produits non raffinés.

e) Conseils

- ✓ Les produits céréaliers complets sont particulièrement précieux. En comparaison des produits raffinés (farine blanche par ex), ils rassasient mieux et contiennent plus de vitamines, de sels minéraux et de fibres alimentaires. Les fibres alimentaires régulent la digestion et sont bénéfiques pour la santé. Préférez les produits complets comme le pain complet, le riz complet, les flocons de blé complet...
- ✓ Tous les pains foncés ou aux graines ne sont pas tous des pains complets. Un pain foncé peut être préparé à base de farine blanche et coloré avec du malt. À la boulangerie, demandez explicitement du pain au blé complet et au magasin, lisez la liste des ingrédients sur l'emballage pour savoir quel type de farine a été utilisé.

4. Produits laitiers, viandes, poissons, œufs et tofu

a) Quels aliments ?

- Les produits laitiers (le lait, yaourt, fromage...)
- La viande, les charcuteries et la volaille
- Le poisson et les fruits de mer

- Les œufs
- Les aliments protéiques végétaux (tofu, seitan, quorn)

b) Quoi et combien ?

Consommer 3 portions de lait ou produits laitiers par jour. 1 portion correspond à 2 dL de lait ou 150-200 g de yaourt, à 30 g de fromage à pâte dure ou mi-dure ou 60 g de fromage à pâte molle.

Consommer chaque jour, en plus des 3 portions de produits laitiers, une portion de viande, de volaille, de poisson, d'œufs, de tofu, de quorn, de seitan, de fromage ou de séré.

Il est conseillé d'alterner entre ces différentes sources de protéines. 1 portion correspond à 100-120 g de viande / volaille / poisson / tofu / quorn / seitan (poids cru) ou 2-3 œufs ou 30 g de fromage à pâte dure ou mi-dure ou 60 g de fromage à pâte molle.

c) Pourquoi ?

Le point commun entre les aliments de ce groupe est leur teneur en protéines. De plus, chacun des aliments mentionnés apporte au corps des nutriments précieux tels que le calcium (lait et produits laitiers), le fer (viande, œufs), la vitamine B12 (tous les aliments protéiques d'origine animale) et les acides gras oméga 3 (poisson).

d) Conseils

- ✓ Savourez un met de poisson une à deux fois par semaine.
- ✓ Il n'est pas nécessaire de consommer de la viande tous les jours. Alternez avec les autres aliments protéiques.
- ✓ Pour le bien de la planète, optez plus souvent pour une journée végétarienne.

5. Huiles, matières grasses et fruits à coque

a) Quels aliments ?

- Huiles et matières grasses (huiles végétales, beurre, margarine)
- Fruits à coque et graines oléagineuses (noix, graines de lin, graines de courge...)
- Autres fruits oléagineux (olive, avocat...)
- Autres aliments gras (la crème, le lait de coco, la mayonnaise...)

b) Quoi et combien ?

Utiliser 2 à 3 cuillères à soupe (20 à 30 g) d'huile végétale par jour, dont au moins la moitié sous forme d'huile de colza. Consommer chaque jour 1 portion (20 à 30 g) de fruits à coque non salés ou de graines. De plus, une petite quantité (env. 1 cuillère à soupe = 10 g) de beurre, margarine, crème, etc. peut être consommée chaque jour.

c) Pourquoi ?

Les aliments de ce groupe sont tous riches en graisses (lipides). Ils sont aussi une source d'acides gras essentiels et de vitamines liposolubles (par exemple, la vitamine E). Les fruits à coque et les graines oléagineuses sont en plus riches en fibres alimentaires, en protéines, sels minéraux, vitamines et substances végétales secondaires. Ces aliments sont à consommer quotidiennement, mais en petite quantité, car la graisse fournit beaucoup d'énergie (calories).

d) Conseils

- ✓ Préférez les huiles végétales présentant une bonne teneur en acides gras oméga 3 favorables à la santé cardiovasculaire. L'huile de colza a une valeur nutritive particulièrement intéressante. Elle convient à la cuisine froide et, lorsqu'elle est raffinée, aussi à la cuisine chaude.
- ✓ Savourez chaque jour une petite poignée (20-30 g) de fruits à coques ou graines oléagineuses non salés. Par exemple : noix, noisettes, amandes, graines de tournesol, de courges ou de lin, etc. avec des céréales, dans un pain, une salade ou en collation.
- ✓ Consommez les mets gras comme les mets panés, les fritures, les mets riches en crème, mayonnaise ou autre matière grasse occasionnellement seulement. Soyez attentif aux graisses cachées, qui se trouvent surtout dans les saucisses et charcuteries, les produits laitiers (yogourt et dessert lactés à la crème, mets au fromage), les pâtisseries, les produits prêts à l'emploi ou les snacks salés. Il vaut la peine de lire et comparer l'étiquetage des aliments.

6. Sucreries, snacks salés et alcool

a) Quels aliments et boissons ?

- Les douceurs et sucreries (le chocolat, les pâtisseries, les biscuits, les glaces, les barres de céréales sucrées, les pâtes à tartiner au chocolat, les confitures, le miel, le sucre...)

- Les snacks salés (les chips, les biscuits d'apéritif...)
- Les boissons sucrées [les boissons au cola, les thés froids, les boissons énergétiques, les tonics, les sirops et les boissons édulcorées (light, zero)...]
- Les boissons alcoolisées (la bière, le vin).

b) Quoi et combien ?

Consommer les sucreries, les boissons sucrées, les snacks salés et les boissons alcoolisées avec modération.

c) La portion

Une portion correspond par exemple à une ligne de chocolat ou à 20 g de pâte à tartiner chocolatée ou à trois petits biscuits ou à une boule de glace ou à une petite poignée (30 g) de snacks salés ou à un verre (2-3 dL) de boisson sucrée. Pour consommer de l'alcool sans risque pour la santé, il est préférable de se limiter à deux verres standards par jour pour les hommes et à un verre standard par jour pour les femmes. Un verre standard correspond à 2 cL d'eau de vie, à 4 cl d'apéritif ou de liqueur, à 1 dL de vin ou à 3 dL de bière.

d) Pourquoi ?

En général, les aliments et boissons de ce groupe apportent tous beaucoup d'énergie (calories) à l'organisme sous forme de sucre et/ou de matière grasse et/ou d'alcool. De plus, les snacks salés contiennent du sel en quantité abondante. A long terme, un excès d'énergie entraîne une prise de poids. L'excès d'alcool et de sel n'est pas favorable non plus à la santé. Mais il n'y a aucun problème à consommer des sucreries, des snacks salés ou des boissons alcoolisées de temps à autre en petite quantité.

e) Conseils

- ✓ Les sucreries, snacks salés et boissons alcoolisées sont là pour être savourés. Prenez le temps de les déguster en toute conscience.
- ✓ Grignoter devant la TV peut mener à trop manger. Quelle que soit la grandeur du paquet de chips ou de la tablette de chocolat, le consommateur à vite fait de les avaler sans s'en rendre compte. Evitez les grignotages continus. Savourez plutôt vos aliments en toute conscience.

- ✓ Si vous avez une grosse envie de douceur ou de grignoter, des fruits ou fruits secs naturellement sucrés ou une petite poignée de fruits à coque non salés peuvent représenter une bonne alternative.
- ✓ Sucrez progressivement moins vos aliments ou boissons. Vous vous habituerez ainsi lentement à apprécier une saveur sucrée moins prononcée.
- ✓ Des cocktails festifs peuvent aussi se préparer sans alcool. Vous trouvez de nombreuses idées et des recettes en naviguant sur Internet. [100]

PARTIE III : ALIMENTATION DU SPORTIF **D'ENDURANCE ET CONSEILS DU PHARMACIEN**

I. Nutrition du sportif d'endurance

A. Glucides

1. Les déterminants du besoin glucidique chez le sportif

La prise en charge de patients sportifs ou de personnes souhaitant s'alimenter correctement lors de leurs activités physiques ou de loisirs nécessite des connaissances sur la nutrition.

De nombreux travaux ont mis en évidence le rôle déterminant des glucides dans les efforts courts et intenses. La connaissance des voies métaboliques mises en jeu lors des exercices prolongés indique que la dépense énergétique est essentiellement couverte par les substrats glucidiques en début d'effort ; les substrats lipidiques prennent une place progressivement plus importante lors de l'épuisement des réserves glycogéniques sous l'effet de la durée de l'effort. Le maintien d'une disponibilité minimale en glucides permet de reculer les limites de la fatigue. Ces données expliquent l'augmentation du besoin en nutriments glucidiques chez les sportifs, avant et pendant l'effort. La physiologie du métabolisme du glycogène permet de comprendre le rôle des nutriments glucidiques sur la performance.

a) Le glycogène musculaire

L'utilisation des substrats glucidiques représente la part principale des substrats utilisés par le muscle lors des efforts intenses au delà de quelques secondes et jusqu'à plusieurs heures.

Le niveau d'utilisation des glucides dépend de deux principaux facteurs qui sont l'intensité et la durée de l'exercice physique.

L'épuisement du glycogène musculaire se produit après environ 90 minutes d'exercice à 75 % du VO_2 max ou après 4 h à 55 % du VO_2 max (figure 40). De plus, il existe une relation entre l'épuisement du glycogène et la diminution de la capacité à produire un exercice physique de niveau élevé. L'épuisement du glycogène musculaire n'impose pas l'arrêt du travail musculaire, mais limite considérablement la capacité de travail maximal.

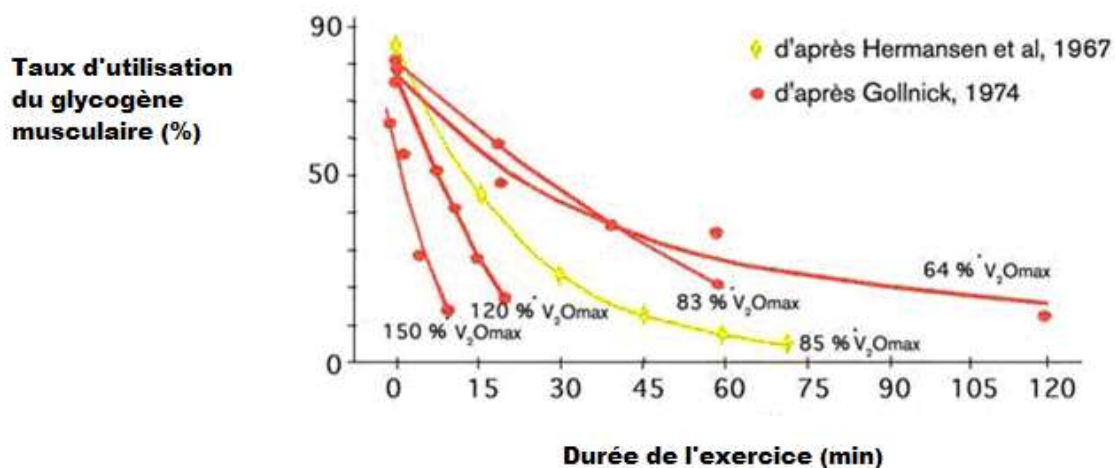


Figure 40 - Effet de l'intensité de l'exercice sur le taux d'utilisation du glycogène musculaire. [101]

b) Le glycogène hépatique

La glycogénolyse hépatique est la seule voie métabolique capable de contribuer à la production de glucose sanguin en dehors des apports alimentaires. La libération de glucose hépatique augmente progressivement au cours de l'exercice musculaire et lors d'un exercice intense, le débit peut être de 4 à 5 fois supérieur au débit de repos. Deux voies métaboliques contribuent à la production de glucose hépatique : la glycogénolyse et la néoglucogenèse.

Leur contribution relative dépend de l'intensité et de la durée de l'exercice. En début d'exercice, la glycogénolyse est la voie prépondérante, la néoglucogenèse devient majeure lors d'un exercice prolongé. La stimulation de ces voies métaboliques est hormonale, elle résulte de l'élévation des catécholamines, du glucagon et de la baisse de l'insuline.

La stimulation de la néoglucogenèse est gouvernée par un double mécanisme, qui tient d'une part à la baisse des réserves glycogéniques du foie et d'autre part à l'élévation du cortisol. La néoglucogenèse permet de pallier à la diminution du débit de la glycogénolyse quand le glycogène hépatique diminue; elle remplace progressivement la glycogénolyse hépatique lors de l'exercice physique prolongé et assure la presque totalité de la production de glucose endogène lorsque l'exercice physique dépasse 3 ou 4 heures. Les précurseurs de la néoglucogenèse sont le lactate, l'alanine et le glycérol. Dans la mesure où la concentration moyenne de glycogène hépatique se situe à 50 g/kg chez l'homme, ce type d'exercice conduit à l'épuisement du glycogène hépatique en deux heures. Ce phénomène est une des causes principales de fatigue lors des efforts prolongés.

Lors de l'exercice prolongé sans apport nutritionnel de glucose, et malgré la mise en jeu de la néoglucogenèse, on constate un déséquilibre entre la capacité maximale de production de glucose et la consommation par les muscles entraînant une baisse modérée de la glycémie et, dans certains cas, une hypoglycémie nette. Les manifestations cliniques de l'hypoglycémie sont particulièrement bien caractérisées ; elles associent une sensation de malaise, des sueurs profondes, et parfois une faim douloureuse avec un besoin impérieux d'absorber des glucides. La connaissance de cette symptomatologie est évidente en pathologie humaine et a conduit tout naturellement à relier l'hypoglycémie de l'exercice physique et la sensation de fatigue. Le système nerveux central est très sensible à l'hypoglycémie induite par l'exercice ; il serait l'effecteur de la sensation de fatigue. Ainsi, la disponibilité en glucides et son incidence sur les modifications de la glycémie seraient susceptibles de jouer un rôle prépondérant sur la tolérance aux exercices de plus d'une heure.

Ces observations soulignent bien le rôle limitant de la disponibilité en glucides sur la performance. Le principal moyen permettant d'optimiser la performance est d'augmenter le niveau des apports glucidiques alimentaires.

2. Nutrition glucidique et performance

a) Effets des régimes enrichis en glucides pendant plusieurs jours avant l'effort

Il a été démontré que ce type de régime augmente de façon constante le taux de glycogène de l'organisme car le niveau des réserves en glycogène hépatique et musculaire dépend exclusivement des apports alimentaires en glucides.

Le rôle critique du niveau des réserves glycogéniques sur la performance physique est mis en évidence par les études de charge glucidique pendant plusieurs jours : Hultman et al. [114] ont démontré que l'augmentation des performances pour des efforts prolongés, sous l'effet de la nutrition glucidique, était corrélée avec l'augmentation des réserves glycogéniques musculaires et hépatiques (figure 41).

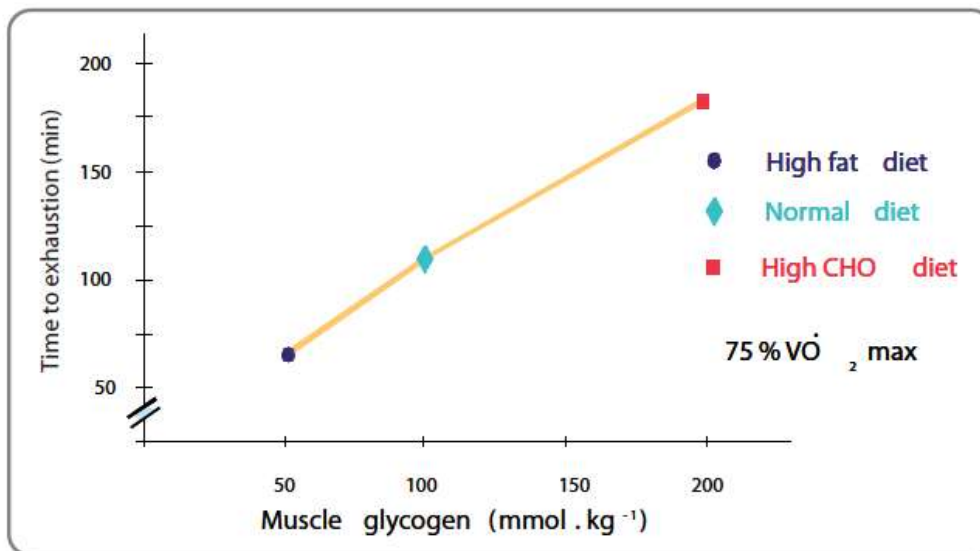


Figure 41 – Effet du type de régime sur le taux de glycogène musculaire et l'endurance. [101]

Cependant, ces données initiales ont donné lieu à de multiples controverses concernant le niveau exact de l'augmentation des réserves glycogéniques avant l'effort pour que l'effet sur la performance soit sensible.

La majorité des études s'accorde pour démontrer que le niveau initial des réserves glycogéniques n'influence pas la performance pour des efforts maximaux inférieurs à 90 minutes. Ainsi, en situation réelle de course à pied, 6 coureurs entraînés ont participé à 3 épreuves successives sur 20 km précédées de trois différents régimes, soit pauvre en glucides, soit normal, soit riche en glucides.

Les résultats ont montré des différences importantes du taux de glycogène selon les régimes sans que cela se traduise par des différences de performance. Il est important de constater que dans cette étude, le dosage du glycogène musculaire avant et après l'épreuve met en évidence un même taux d'utilisation du glycogène musculaire quel que soit le régime. Elle a même montré que, pour le régime carencé en glucides, il reste des quantités très substantielles de glycogène musculaire à l'issue d'une heure d'effort maximal. Concernant les efforts de plus de 90 minutes, la majorité des études met en évidence une augmentation de performance sous l'effet d'un régime préalablement enrichi en glucides : Galbo et al. [115] ont montré qu'un régime enrichi à 70 % en glucides induit une augmentation de 66 % du temps d'endurance. En revanche, lorsque l'on utilise non plus le temps d'endurance mais la performance chronométrique sur une distance fixe, le gain obtenu par la charge glucidique est moins important : un gain moyen de 3 à 4 % de performance sous l'effet d'un régime riche en glucides pour des compétitions d'endurance sur des durées supérieures à 90 minutes.

Il existe néanmoins des limites des effets de la charge glucidique qui sont bien illustrées par une étude récente de Burke et al. [116] : pour des épreuves successives de 100 km, la charge glucidique augmente bien le glycogène musculaire de 20 % mais il n'y a pas d'augmentation de la performance.

En conclusion, on peut estimer que pour des efforts très prolongés, le régime hyperglucidique comparé à une alimentation normoglucidique apporte un gain significatif mais faible de performance. En revanche, une alimentation habituelle insuffisante en glucides peut diminuer les capacités d'effort en endurance, même pour des efforts plus courts.

b) Effets de la nutrition glucidique administrée juste avant ou pendant l'exercice musculaire

Le rôle de l'apport de nutriment glucidique administré dans les heures précédant l'exercice physique sur la performance a fait l'objet de résultats contradictoires. Certaines études mettent en évidence une augmentation de performance, une diminution, ou une absence d'effet.

Ces contradictions s'expliquent par les différences dans le moment de l'ingestion des glucides avant l'effort, par la quantité de glucides et surtout leur nature. Les travaux de Koivisto [117] ont montré que l'ingestion de glucose avant l'exercice est suivie d'une hyperglycémie réactionnelle qui provoque une forte réponse insulinaire.

Cette réponse insulinaire peut induire une hypoglycémie en début d'effort. Ce phénomène est favorisé par l'augmentation du transport du glucose du secteur circulant vers le muscle dès le début du travail musculaire. Ce phénomène a été rendu responsable de la diminution de performance lors d'un effort précédé de l'ingestion d'un sucre rapide plusieurs dizaines de minutes avant son début.

Cependant, il existe des moyens permettant d'apporter des glucides avant l'effort sans phénomène d'hypoglycémie réactionnelle. En premier lieu on peut utiliser des glucides avec un faible index glycémique (IG), tels que le fructose ou des glucides lents (riz, pâtes alimentaires) qui réduisent de 50 % la réponse insulinaire et ne produisent pas d'hypoglycémie réactionnelle (figure 42).

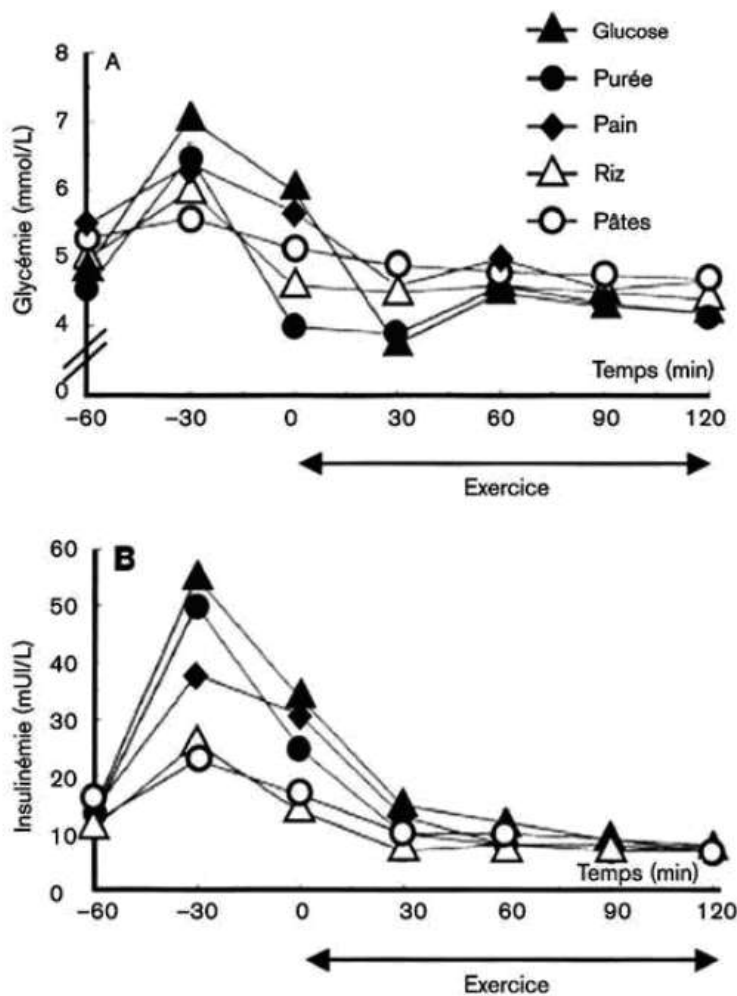


Figure 42 – Réponses glycémique (A) et insulémique (B) après ingestion de 200 kcal de glucose, de purée, de pain, pâtes ou riz, 1h avant un exercice de 2 h. [101]

Les effets de l'ingestion de glucides avant l'effort sur la performance sont renforcés si cette administration est suivie d'un apport glucidique pendant l'effort.

L'effet sur la performance de la nutrition glucidique administrée avant un effort prolongé se heurte aussi à une limite qui est celle de la durée de l'effort pendant laquelle cet apport sera efficace : les substrats glucidiques ingérés avant l'effort (100 g de glucose) sont métabolisés en 120 minutes.

Il reste donc une faible quantité de nutriment métabolisable à partir de la période où l'apport en glucides devient nécessaire pour suppléer aux réserves endogènes. L'effet des glucides sur la performance peut s'expliquer par une diminution de l'utilisation des réserves glycogéniques musculaires et hépatiques. Contrairement aux résultats relativement contradictoires obtenus avec la nutrition glucidique avant l'exercice musculaire, la majorité des études s'accorde pour démontrer un effet net de la nutrition glucidique pendant l'exercice

musculaire sur la performance. Le résultat le plus marquant est celui de Coyle et al. [118] qui met en évidence une augmentation de la durée d'effort de presque une heure lors d'une épreuve menée jusqu'à l'épuisement à 70 % du VO_2 max.

L'effet bénéfique sur la performance résulte d'une augmentation de l'oxydation du glucose exogène en remplacement des substrats endogènes et non pas de l'épargne du glycogène. Le fait que les glucides favorisent l'épargne du glycogène semble plus net lors de la réalisation d'exercice intermittent, cette donnée étant particulièrement utile pour conseiller les pratiquants des sports collectifs. Un effet particulièrement important des glucides sur le plan de la performance en compétition résulte d'une amélioration des capacités de performance maximale.

Ainsi, Febbraio et al. [119] ont montré une amélioration de la puissance maximale à l'issue de 2 heures d'exercice sous-maximal, lorsque les sujets absorbaient 2 g/kg de poids de glucides (boisson) 30 minutes avant et ce toutes les 30 minutes pendant l'effort. Cette expérimentation reproduit les conditions d'une course cycliste avec le sprint final (figure 43).

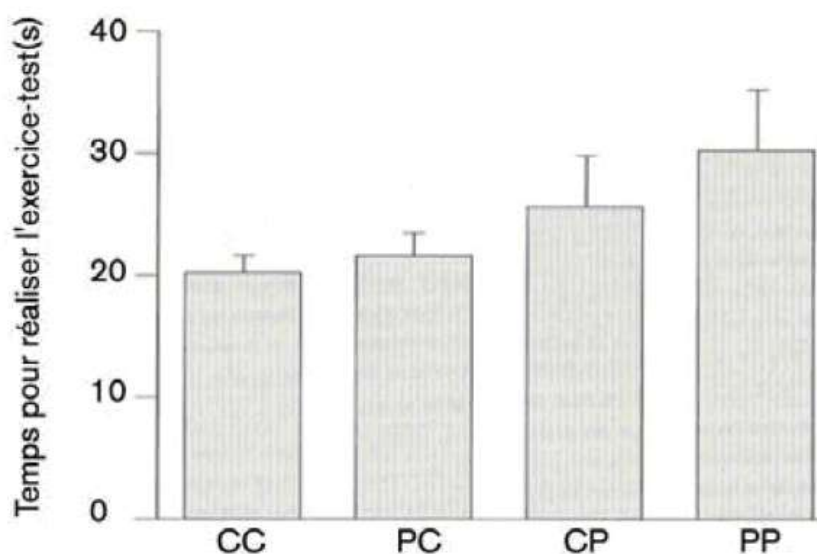


Figure 43 - Effets de l'ingestion d'hydrates de carbone sur les performances au cours d'un sprint-test réalisé après 2 h d'exercice sous-maximal. [101]

Cette expérimentation reproduit les conditions d'une course cycliste avec le sprint final

Prise de glucides (2 g/kg) pendant un exercice à puissance constante :

- 30 min avant et toutes les 30 min (CC) ;
- uniquement pendant (PC) ;
- uniquement avant l'exercice continu (CP) ;
- PP : placebo avant et pendant.

Ces travaux soulignent donc l'intérêt sans équivoque de l'apport de nutriment glucidique pendant l'effort. La nature, le volume et la séquence d'administration des glucides pendant l'effort est conditionnée par la physiologie de leur vidange gastrique, la vitesse de métabolisation et surtout la tolérance digestive.

La vidange gastrique est une étape cruciale qui détermine la vitesse du remplacement des liquides de l'organisme perdus par la sueur et l'apport concomitant de nutriments. Plusieurs facteurs assurent le contrôle de la vitesse de vidange de l'estomac, et interagissent entre eux, tels le volume ingéré, la composition des boissons, leur température, et l'intensité de l'exercice.

3. Nutrition glucidique et récupération

La diminution du glycogène musculaire résultant d'un exercice prolongé stimule l'activité des voies métaboliques de la glycogénosynthèse pendant la récupération. L'apport de nutriments glucidiques dans cette phase de récupération aboutit à deux phénomènes qui sont d'une part une accélération de la vitesse de re-synthèse, et d'autre part une augmentation du taux de glycogène au-dessus des valeurs préalables à l'exercice.

Ce dernier point appelé surcompensation est déterminant pour la capacité à réaliser des efforts successifs plusieurs jours de suite. Lors de plusieurs jours de course prolongée, chez des sujets ingérant un régime mixte comprenant 250 à 350 g de glucides par jour, on observe une diminution progressive des stocks de glycogène à l'issue de chaque période de récupération, alors qu'à l'inverse chez ceux qui reçoivent un apport se situant entre 500 et 600 g par jour, on observe une récupération complète entre chaque séance (figure 44). De plus, dans la phase de récupération, la nature des glucides influence la capacité de re-synthèse : il est plus efficace d'administrer des glucides avec un index glycémique élevé.

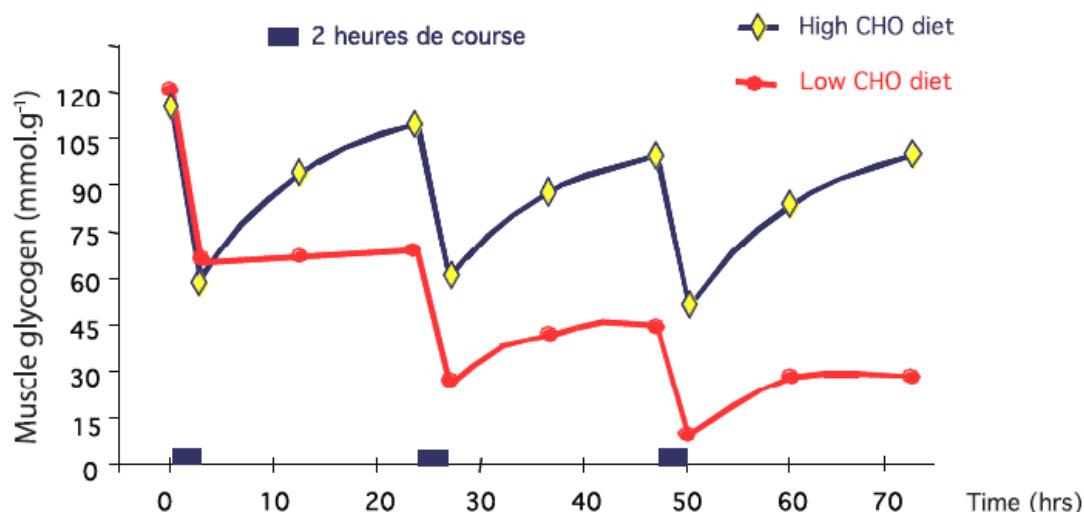


Figure 44 – Effet de la nutrition sur le taux de glycogène musculaire lors d'entraînements répétés. [101]

4. Alimentation pratique avant une épreuve d'endurance

Les enquêtes alimentaires indiquent que la consommation spontanée de glucides des sujets sportifs est identique à la population générale : on observe une insuffisance de l'apport qui est inférieur à 50 % de l'apport énergétique. Dans les jours précédant l'épreuve, il est donc très efficace d'augmenter cet apport autour de 60 à 70 % afin d'augmenter les réserves glycogéniques. Nous avons vu qu'une valeur élevée de glycogène musculaire est susceptible d'améliorer la performance pour des efforts de plus de 90 minutes. Chez un sujet recevant 50 % de glucides dans sa ration habituelle, l'augmentation de cet apport à 70 % pendant 3 jours double la concentration en glycogène musculaire. Cet effet important de la nutrition hyperglucidique sur la concentration glycogénique a conduit à rechercher des procédés nutritionnels capables de l'optimiser.

Le plus connu est le régime dissocié scandinave qui consiste 6 jours avant une compétition à réaliser successivement 3 jours de régime pauvres en glucides et 3 jours de régime hyperglucidique.

La période de carence glucidique, par un effet de up-régulation des systèmes de transport du glucose associé à une augmentation de l'activité des enzymes glycogénosynthétiques, permet d'obtenir des concentrations glycogéniques très élevées lors de la ré-introduction des glucides alimentaires. Cependant, ce régime présente des inconvénients. La poursuite de l'entraînement pendant la phase pauvre en glucides entraîne une sensation de fatigue très

importante. Dans cette phase, on a décrit une fréquence élevée d'accidents musculaires. Enfin, les brusques variations de l'apport du lest cellulosique provoquent fréquemment des troubles du transit.

La majeure partie de la surcompensation peut être obtenue avec seulement 3 jours d'un régime comprenant 70 % de glucides sans phase hypoglucidique préalable. La raison recommande d'utiliser exclusivement ce dernier procédé nutritionnel qui est sans inconvénient. Pendant la phase hyperglucidique de la préparation de l'épreuve, il est important que le sujet pèse ses aliments pour maintenir un apport calorique constant. Augmenter l'apport glucidique accroît le volume des repas ce qui peut induire à court terme une sensation de satiété.

- *En pratique*

Dans cette phase ultime de la préparation alimentaire, le but principal est de maintenir les réserves glucidiques de l'organisme au plus haut niveau par une poursuite du régime hyperglucidique. Le soir précédent l'épreuve, 150 à 200 g de pâtes alimentaires seront consommées en évitant scrupuleusement les sauces relevées. Le jour de l'épreuve, l'apport des calories glucidiques se poursuit jusqu'au moment du départ. Après un petit déjeuner à la française enrichi par des céréales, l'apport glucidique dans les heures précédant l'épreuve sera assuré par la consommation de riz ou de pâtes alimentaires : l'absorption de 200 kcal de riz, de pâtes, de pain ou de pommes de terre 1 heure avant une épreuve de longue durée ne produit pas de troubles digestifs pendant l'épreuve. Ces calories d'origine glucidique ingérées sous forme de sucres complexes seront lentement métabolisées puisque leur effet sur la glycémie sera sensible pendant les 2 premières heures de l'épreuve. Ce type d'alimentation dispense d'apporter une charge glucidique dans les minutes précédant le départ. Cette préparation des dernières heures doit amener sur la ligne de départ un sujet présentant un état métabolique de sujet nourri avec des réserves de glycogène hépatique à leur plus haut niveau, un capital hydrique élevé, sans que ce plan alimentaire soit source d'un inconfort digestif pendant l'épreuve.

5. Alimentation pendant l'épreuve d'endurance

Nous avons vu que la performance était augmentée par des apports réguliers de nutriments glucidiques pendant un effort de plus de 90 minutes. Ces nutriments devront être rapidement métabolisés, ne pas perturber la vidange gastrique de l'eau, ne pas être source de troubles digestifs. La majorité des résultats s'accordent pour démontrer que l'effet sur la

performance est obtenu pour des apports se situant entre 20 g et 50 g de glucides par heure d'exercice physique. La quantité totale de glucose métabolisé est supérieure si l'apport est fractionné pendant l'épreuve. La vitesse de métabolisation n'est pas modifiée par la forme de l'aliment solide ou liquide. La forme solutée à l'avantage d'apporter l'eau en même temps que les calories. Cependant, pour des efforts très prolongés de plus de 8 heures tels que le triathlon de longue distance, la course à pied de 100 km, le raid aventure, il est préférable de répartir l'apport glucidique à part égale sous forme solide et liquide pour des raisons de rapidité et de confort digestif. La combinaison de l'apport glucidique et de l'apport hydrique va se heurter à deux problèmes, la vidange gastrique et les troubles digestifs. Pendant l'épreuve, un apport de glucides sous forme mixte glucose-fructose à la dose de 20 g dilué dans 500 ml d'eau par heure d'effort est conseillé. Ce plan indicatif doit être adapté selon les conditions climatiques et la tolérance individuelle. [101]

B. Lipides

1. Apports des différents types d'acides gras

Pour la population générale comme pour le sportif, les apports nutritionnels conseillés en lipides sont de 30 à 35 % de l'apport énergétique total en préconisant la répartition suivante pour les différents types d'acides gras : 25 % d'acides gras saturés, 60 % d'acides gras mono-insaturés et 15 % d'acides gras polyinsaturés.

Les acides gras polyinsaturés, dont les deux principales classes sont les omégas 3 et 6, représentent une classe particulière de lipides qui semble intéressante dans le domaine du sport et de la santé. Plusieurs études ont montré que des supplémentations en AGPI, combinées ou pas avec un programme d'entraînement physique en endurance, améliorent le profil lipidique, diminuent le risque cardiovasculaire, diminuent l'inflammation, et favorisent la perte de poids.

2. Intérêt d'une supplémentation en oméga 3

Plusieurs études ont montré l'intérêt des supplémentations nutritionnelles spécifiques, type $\omega 3$ sous forme de capsules contenant l'acide eicosapentanoïque (EPA) plus l'acide docosahexanoïque (DHA), combinées à de l'exercice physique en aérobic, pour améliorer le profil lipidique de sujets sains, donc prévenir potentiellement le risque de maladies cardiovasculaires.

La supplémentation sous forme de graisses dans l'alimentation du sportif n'a pas montré de bénéfices sur la performance physique contrairement aux hydrates de carbone. En revanche, de nombreux sportifs tendent à adopter des régimes alimentaires pauvres en lipides (inférieurs à 25 % de l'apport énergétique total) qui limitent l'apport en acides gras essentiels.

3. Besoins en lipides du sportif d'endurance

Pour que les besoins en acides gras essentiels mais aussi en vitamines liposolubles soient couverts, il a été conseillé pour la population sportive d'avoir un apport minimal en lipides entre 1 et 1,2 g/kg/j.

En 2004, Chos et Riche [120] ont conduit une étude visant à évaluer les besoins en lipides de 19 volontaires sportifs pratiquant la course à pied de longue distance ou le cyclisme et ayant un gros volume d'entraînement.

Les résultats ont montré que 18 sportifs sur 19 présentaient, sur le plan biologique, des perturbations, touchant plus particulièrement le statut en $\omega 3$, en dépit d'un apport moyen en lipides de l'ordre de 1,5 g/kg par jour. Les auteurs ont montré que l'éviction systématique de l'huile de colza a donné lieu, à chaque fois, à une anomalie biologique touchant la voie des $\omega 3$. L'analyse des taux des différents acides gras des phospholipides de la membrane des globules rouges (AGS, AGMI et AGPI) a notamment montré qu'un ou plusieurs acides gras $\omega 3$ étaient plus bas que la valeur jugée normale pour une population de référence du même âge, le plus fréquemment abaissé étant l'acide alphalinolénique (ALA).

Les auteurs ont constaté également que ce sont les sujets dont la ration glucidique est largement déficitaire (moins de 5 g/kg par jour) et qui ne présentent pas de surpoids, qui possèdent un statut lipidique perturbé.

L'apport énergétique sous forme de glucides paraît ainsi déterminant sur le statut en acides gras des sportifs. Cette étude conseille de revoir à la hausse les recommandations d'apport de sécurité en lipides pour la population sportive et de le porter à 1,3 g/kg par jour, en assurant un apport glucidique optimal en période d'entraînement (> 6 g/kg par jour).

Les auteurs soulignent que chez les sportifs, les besoins en oméga 6 et oméga 3 sont équivalents à ceux de la population générale. Ils conseillent de communiquer auprès des sportifs sur les vertus nutritionnelles du régime méditerranéen [riche en acide oléique (AGMI), pauvre en graisses saturées (AGS), et ne contenant pas trop d'oméga 6], et d'insister

plus particulièrement sur l'intérêt certain de la consommation journalière d'huile de colza contenant des AGMI, les deux types d'AGPI ($\omega 6$ et $\omega 3$), et des antioxydants. En revanche, la question a aussi été posée de l'intérêt des suppléments en AGPI $\omega 3$ qui pourraient être bénéfiques sur l'inflammation liée à l'exercice physique. [102]

C. Protéines

1. Balance protéique

Dans notre organisme, le rapport entre la synthèse (ou anabolisme ou protéosynthèse) et la dégradation (ou catabolisme ou protéolyse) des protéines, représente ce que l'on appelle communément « balance protéique » qui est normalement stable. Pour le sportif, cette balance protéique, difficile à évaluer par des moyens simples à l'effort, dépend notamment des apports alimentaires en protéines et du type d'exercice réalisé.

Les questions les plus souvent débattues selon que le sport soit endurant ou de force sont :

- de déterminer si un apport ; élevé en protéines est bénéfique pour la performance physique en général,
- et si cet apport supplémentaire peut contribuer à favoriser le développement de la masse musculaire, et donc potentiellement l'augmentation de la force et de la puissance.

2. Métabolisme des acides aminés pendant l'exercice endurant

L'exercice physique prolongé est associé à une diminution de l'ensemble des processus de protéosynthèse musculaire. Elle peut par exemple atteindre 40 % pour un exercice de 2 heures à puissance constante. Lorsque les apports nutritionnels sont limités, notamment en glucides, il se produit une augmentation de la dégradation protéique dans le but de fournir des acides aminés qui seront utilisés comme substrats énergétiques par le muscle squelettique.

Seuls quelques acides aminés peuvent être directement oxydés au niveau du muscle, ce sont les acides aminés branchés ou ramifiés (AAB : leucine, isoleucine, valine) et plus rarement l'acide glutamique et l'acide asparagique.

Ces acides aminés sont dans un premier temps désaminés pour former un acide alphacétonique qui est ensuite soit inséré dans le cycle de Krebs pour fournir de l'énergie par voie oxydative, soit utilisé pour former du glucose par la néoglucogénèse.

Pendant l'exercice de longue durée (> 2 heures), c'est l'augmentation de l'urée plasmatique ou de l'ammoniaque qui témoigne indirectement de l'utilisation des composés azotés. Des méthodes plus précises, basées sur le suivi de composés marqués avec des traceurs radioactifs stables, ont permis de montrer l'augmentation de l'oxydation des AAB et en particulier l'oxydation de la leucine.

L'oxydation des AAB à l'exercice endurant est dépendante de plusieurs facteurs :

- la disponibilité en glucides qui est liée aux stocks de glycogène et aux apports endogènes et exogènes de glucides,
- la durée et l'intensité de l'exercice,
- le niveau d'entraînement,
- le sexe.

C'est ainsi que l'oxydation des AAB augmente avec l'intensité de l'exercice et la déplétion des stocks de glycogène.

Les sujets entraînés ont une augmentation de l'oxydation de la leucine à l'exercice par rapport à des sujets non entraînés ; les femmes ont une augmentation de l'oxydation de la leucine inférieure à celle des hommes.

Il est important de souligner que, même si l'utilisation des substrats azotés pour fournir de l'énergie à l'exercice reste faible (de 3 à 10 %), elle peut avoir des conséquences fonctionnelles importantes telles que la lyse des protéines contractiles.

Il est possible de juger indirectement de la protéolyse musculaire en mesurant l'excrétion urinaire de la 3-méthylhistidine qui est un acide aminé quasi-spécifique au muscle (90 % de cet acide aminé entre dans la composition de la myosine et de l'actine).

3. Apports en acides aminés branchés et performance pendant l'exercice endurant

L'oxydation des AAB au cours d'un exercice prolongé a été le support de la théorie sérotoninergique de la fatigue centrale. L'augmentation de la synthèse de ce neurotransmetteur est impliquée dans l'apparition de la fatigue, l'anxiété, les troubles du sommeil et la perte de l'appétit.

L'oxydation des AAB se traduit par une diminution de leur concentration plasmatique qui favorise l'entrée du tryptophane, précurseur dans la synthèse de la sérotonine, au niveau du système nerveux central. Le tryptophane pénètre dans le cerveau par un transporteur qui lie

également les AAB. Donc, toute diminution de la concentration plasmatique des AAB induit une augmentation de la pénétration du tryptophane, donc une augmentation de la synthèse de sérotonine.

À partir de cette théorie, plusieurs expérimentations ont exploré l'intérêt d'une supplémentation en AAB durant l'exercice prolongé pour retarder l'apparition de la fatigue, par limitation de la synthèse de sérotonine, et donc la diminution des performances physiques. La majorité des expérimentations a étudié des suppléments d'AAB (contenant leucine, isoleucine et valine) en prise unique ou multiple mais en aigu sur des exercices physiques prolongés. À l'heure actuelle, aucune n'a pu montrer, à l'exception de celle de Blomstrand et al. [121] chez des marathoniens, une amélioration de la performance physique.

En revanche, même s'il n'existe aucune preuve scientifique de l'intérêt de la supplémentation en AAB pour améliorer la performance physique pendant un exercice prolongé, la reprise des synthèses protéiques à l'arrêt de l'exercice nécessitera une disponibilité optimale en acides aminés pour assurer la reconstruction des protéines lysées. Un apport d'acides aminés dans les 2 heures qui suivent l'arrêt de l'exercice peut être conseillé.

Les expérimentations ayant étudié des suppléments d'AAB en chronique sur des périodes d'entraînement ou dans des situations incluant des exercices prolongés et répétés (raids à ski) n'ont pas montré d'amélioration en termes de performance aérobie ou anaérobie, ou en termes de gain de force musculaire.

En revanche, récemment, la question de l'intérêt d'une supplémentation contenant exclusivement de la leucine est à nouveau posée. Crowe et al. [123] ont ainsi montré chez des canoéistes, en majorité des femmes supplémentées pendant 6 semaines par un apport journalier de L-Leucine (45 mg/kg/j), une augmentation de la performance physique testée lors d'un exercice physique maintenu jusqu'à l'épuisement et une augmentation de la force des membres supérieurs.

A la suite des travaux préliminaires de l'équipe de Blomstrand (années 1990) l'hypothèse a été émise de l'intérêt des AAB sur la performance mentale. En 1991 [124], cette équipe a montré une amélioration des performances mentales à l'issue d'un match de football où les joueurs ont ingéré une boisson mixte contenant des AAB et des glucides.

Cette hypothèse d'amélioration des performances mentales pour des sports d'endurance à composante cognitive importante, tels que les sports d'équipe, la course d'orientation, le biathlon, est encore en cours de validation.

4. Recommandations d'apports en protéines chez le sportif endurant

Compte tenu des différents arguments scientifiques, on peut recommander au sportif endurant de consommer quotidiennement entre 1,5 et 1,7 g/kg/j de protéines, l'apport estimé pour un adulte non entraîné étant d'environ 0,8 g/kg/j. Par rapport à l'apport énergétique total, la part sous forme de protéines devrait être de 12 à 16 %.

Par ailleurs, la co-ingestion de protéines avec des glucides en période de récupération permet d'activer la vitesse de synthèse protéique et de réduire la protéolyse. [103]

D. Micronutriments

« Occupez-vous des calories, le reste suivra », affirmait Astrand au début des années 1970. Le recul acquis depuis dans ce domaine a peu à peu contredit ce dogme un peu trop réducteur. Divers travaux décrivent que, sous l'effet de besoins augmentés ou de pertes accrues, l'optimisation du statut micronutritionnel des sujets sportifs passe par des apports accrus. Il est difficile d'apprécier le statut individuel de chaque membre de la population sportive, considérée, dans sa globalité comme un groupe à risque. Il paraît acquis, aujourd'hui, qu'une fraction non négligeable de la population des sportifs d'endurance présente des déficits micronutritionnels, c'est-à-dire des apports sub-optimaux susceptibles d'occasionner des perturbations fonctionnelles. Face à ceux-ci, la stratégie correctrice à adopter suscite des débats passionnés. La complémentation individualisée à visée sanitaire, telle que la pratique les médecins nutritionnistes, est parfois considérée comme une incitation à la conduite dopante.

Quoiqu'il en soit, la recherche d'une ration à haute densité nutritionnelle est une démarche nécessaire, qui ne suffira pas forcément pour optimiser le statut micronutritionnel des sportifs d'endurance. Le contenu d'assiette « idéal » en théorie devra respecter au plus près les recommandations du PNNS (Programme National Nutrition Santé), et fournir au sportif suffisamment de fruits et légumes frais (au moins cinq portions par jour), une diversité de céréales et légumes secs, si possible complets, des huiles de qualité première pression à froid « bio », une ingestion régulière de poisson (notamment gras) et éventuellement la prise régulière d'aliments très riches en divers micronutriments comme le foie, le germe de blé, la

levure de bière, les noisettes, le chocolat, en fonction des goûts et des possibilités de chacun. Ces choix assurés, rien ne permet pour autant de présumer de la disponibilité de ces nutriments en quantité suffisante au niveau cellulaire, en particulier en raison de l'étape digestive parfois très perturbée. Il nous paraît en tout cas évident que les conseils habituellement donnés aux sportifs, mettant l'accent sur les féculents, le riz, les pâtes, le pain blanc, ne conviennent pas sur ce plan-là. [104]

II. Exemples de produits conseils

A. Les compléments alimentaires

a) Généralités

Les compléments alimentaires sont définis comme « des denrées alimentaires dont le but est de compléter un régime alimentaire normal et qui constituent une source concentrée de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique ».

Les substances constituant les compléments alimentaires n'exercent pas d'action thérapeutique et n'ont pas vocation à prévenir ou guérir une maladie.

En revanche, les étiquettes des compléments alimentaires peuvent comporter des allégations de santé. Une allégation de santé est définie comme tout message ou représentation « qui affirme, suggère ou implique l'existence d'une relation entre d'une part, une catégorie de denrées alimentaires, une denrée alimentaire ou l'un de ses composants, et d'autre part, la santé »

Toute denrée alimentaire destinée aux consommateurs, y compris celles présentées comme des compléments alimentaires, doit répondre aux obligations de sécurité, de loyauté et d'information édictées par la réglementation en vigueur. Les produits mis sur le marché doivent être sans danger et porter un étiquetage adéquat et approprié afin de garantir un niveau élevé de protection des consommateurs. En France, les compléments alimentaires contiennent des vitamines et minéraux à des concentrations limitées par la réglementation.

b) Risques

Les compléments alimentaires mis sur le marché ne sont pas soumis systématiquement à une évaluation scientifique préalable visant à garantir leur qualité. C'est le distributeur qui est responsable de la conformité de la mise sur le marché dans le respect des normes en vigueur, de sécurité et de non-tromperie du consommateur.

Des sites Internet basés hors de France peuvent proposer des compléments alimentaires contenant des substances interdites par la législation française.

Par ailleurs, mal utilisés, ces compléments peuvent avoir des conséquences néfastes sur la santé des consommateurs et entraîner des effets toxiques en raison notamment de surdosage ou de surconsommation (dépassement des doses ou prises concomitantes de plusieurs compléments alimentaires).

c) Surveillance

Dès lors que le consommateur suspecte des effets indésirables, il devra en informer tout professionnel de santé quel qu'il soit (son médecin traitant, un pharmacien d'officine...). Ces derniers aideront le consommateur à établir un lien de causalité entre ce qu'il a ingéré et son effet indésirable et pourront, le cas échéant, déclarer les effets indésirables à l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES).
[122]

B. Gamme EA FIT (laboratoire EA PHARMA)

1. Avant l'effort

a) MyoControl® - 30 comprimés

- ✓ Améliore le fonctionnement musculaire
 - ✓ Action antioxydante
 - ✓ Contribue à réduire la fatigue
-
- *Complément alimentaire contre les crampes et favorisant la relaxation musculaire*
 - *Composition pour 2 comprimés*
 - ✓ Vitamine B1 : 4,2 mg (382 % des AJR)
 - ✓ Vitamine B5 : 18 mg (300 % des AJR)
 - ✓ Vitamine B6 : 2 mg (143 % des AJR)
 - ✓ Vitamine B3 : 54 mg (338 % des AJR)
 - ✓ Vitamine C : 180 mg (225 % des AJR)
 - ✓ Vitamine E : 30 mg (250 % des AJR)
 - ✓ Vitamine D : 5 µg (100 % des AJR)
 - ✓ Calcium : 240 mg

- ✓ Sodium : 50 mg
- ✓ Magnésium : 90 mg
- ✓ Potassium : 40 mg
- ✓ Sélénium : 25 µg (45 % des AJR)
- ✓ Extrait de vigne rouge : 130 mg
- ✓ Extrait de marc de raisin : 81 mg
- ✓ Lithotamme : 75 mg
- ✓ Quinquina : 60 mg
- ✓ Extrait de pissenlit : 42 mg
- ✓ Extrait de chiendent : 33 mg

- *Conseils d'utilisation*

Prendre 2 comprimés par jour de préférence le matin avec un grand verre d'eau, en programme de 15 jours avant la compétition. A renouveler si nécessaire.

b) **Optisodyne**® - 60 gélules

- ✓ Protège contre le stress oxydatif
- ✓ Optimise la préparation à l'effort
- ✓ Contribue à réduire la fatigue

- *Action antioxydante*

Complément alimentaire à base de Super Oxyde Dismutase (SOD) destiné à augmenter la performance.

- *Composition pour 2 gélules*

- ✓ Extrait de melon titré en SOD : 35.72 mg soit 500 UI (unités internationales)
- ✓ Sélénium : 50 µg (91% AJR)
- ✓ Vitamine B2 : 1,4 mg (100% AJR)

- *Conseils d'utilisation*

A utiliser en programme de préparation pour la saison sportive et particulièrement pendant les périodes d'efforts intenses (entraînements spécifiques, compétitions...).

Prendre 2 gélules par jour pendant 15 jours puis 1 gélule par jour pendant 1 mois, de préférence le matin avec un grand verre d'eau. Renouveler ces programmes en respectant un intervalle d'1 mois entre 2 programmes.

c) **Inergy Cake**® - poudre : 400 g – saveur chocolat

- ✓ Procure un surplus d'énergie
- ✓ Augmente les performances
- ✓ Contient des fibres et de l'acérola

- *Cake énergétique de pré-compétition*

Inergy Cake® est idéal en pré-compétition car chaque gâteau apporte en moyenne 1476 Kcal. Sa formule riche en vitamines et minéraux associe du guarana pour un apport énergétique maximal. Il contient aussi des protéines issues du blanc d'œuf qui participe au maintien de l'intégrité musculaire.

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 100 g de poudre*

- ✓ Valeur énergétique : 396 Kcal
- ✓ Protéines : 12,1 g
- ✓ Glucides : 65,3 g (dont sucres : 42,5 g)
- ✓ Lipides : 9,6 g (dont acides gras saturés (AGS) : 2,8 g)
- ✓ Fibres : 3,2 g
- ✓ Guarana : 420 mg
- ✓ Acérola : 246 mg

- *Conseils d'utilisation*

Facile à préparer : 30 minutes au four, 3 minutes au micro-ondes.

Inergy® Cake se conserve 2 jours après cuisson ou peut être congelé (Ne jamais recongeler un produit décongelé).

Prendre 1/3 ou 1/2 Inergy® Cake avant l'effort en fonction de sa durée et de son intensité. Il peut être consommé jusqu'à 1h30 avant l'effort pour une diffusion d'énergie progressive.

d) **Gel Inergy Start**® - Boites de 10 ou 36 gels - Saveur Orange

- ✓ Contribue à l'apport énergétique
- ✓ Action antioxydante
- ✓ Contribue à réduire la fatigue

- *Gel énergétique pré-effort*

Gel énergétique pré-effort à énergie immédiate et longue durée, il associe :

- un complexe spécifique d'hydrates de carbone, qui combine glucose, maltodextrine et fructose.
- des vitamines énergétiques du groupe B (B1, B2, B6).

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 35 g (1 sachet)*

- ✓ Valeur énergétique : 98 Kcal
- ✓ Protéines : 0 g
- ✓ Glucides : 24,5 g (dont sucres : 15 g)
- ✓ Lipides : 0 g (dont AGS : 0 g)
- ✓ Fibres : 0 g
- ✓ Sodium : 82 mg
- ✓ Potassium : 34 mg
- ✓ Magnésium : 16 mg
- ✓ Vitamine A : 28 µg (3,5 % des AJR)
- ✓ Vitamine C : 10 mg (12,5 % des AJR)
- ✓ Vitamine E : 1,6 mg (13 % des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,23 mg (21 % des AJR)
- ✓ Vitamine B2 : 0,26 mg (18 % des AJR)
- ✓ Vitamine B6 : 0,33 mg (23 % des AJR)
- ✓ Vitamine B9 : 32,9 µg (16 % des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

À prendre *juste avant l'effort*, sur la ligne de départ pour un apport énergétique immédiat et longue durée. *Prendre 1 à 3 gels* en association à une hydratation régulière.

2. Pendant l'effort

a) **Boisson Inergy + ®** - poudre : 500 g - saveurs menthe ou orange

- ✓ Contribue à l'apport énergétique
- ✓ Action antioxydante
- ✓ Contribue à réduire la fatigue

- *Boisson énergétique pour les efforts modérés (0 à 2 h)*

Préparation pour boisson isotonique à consommer tout au long de l'effort, en particulier par temps chaud, pour assurer une hydratation optimale et un apport énergétique constant.

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 100 g*

- ✓ Valeur énergétique : 364 Kcal
- ✓ Protéines : traces
- ✓ Glucides : 91,1 g (dont sucres : 18,3 g)
- ✓ Lipides : traces
- ✓ Fibres : traces
- ✓ Vitamine C : 30 mg (38 % des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,7 mg (64% des AJR)
- ✓ Vitamine B6 : 1 mg (71 % des AJR)
- ✓ Potassium : 190 mg
- ✓ Magnésium : 35 mg
- ✓ Sodium : 736 mg

- *Conseils d'utilisation*

- ✓ 500 g de poudre = volume pour 15 bidons de 500 mL
- ✓ 1,5 dosettes (50 g) => bidon de 750 mL
- ✓ 1 dosettes (33 g) => bidon de 500 mL

À consommer le plus régulièrement possible pendant l'effort, *idéalement 1 à 2 pleines gorgées toutes les 10 minutes.*

b) **Boisson Inergy PRO**® – poudre : 500 g – Saveurs fruits rouges, orange sanguine ou thé pêche

- ✓ Assure une réhydratation et un apport énergétique optimal
- ✓ Améliore la résistance à l'effort
- ✓ Complexe glucidique pour une couverture énergétique maximale

- *Boisson énergétique pour les efforts intenses (2 à 4 h)*

Elle fournit un apport énergétique complet et assure une réhydratation et une résistance à l'effort grâce à :

- son osmolarité,
- sa teneur en glucides simples (dextrose, sirop de glucides),
- sa teneur en glucides complexes (maltodextrines),
- sa teneur en sodium.

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 100 g*

- ✓ Valeur énergétique : 360 Kcal
- ✓ Protéines : traces
- ✓ Glucides : 89,9 g (dont sucres 36,6 g)
- ✓ Lipides : traces
- ✓ Fibres : traces
- ✓ Vitamine C : 30 mg (38 % des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,7 mg (64% des AJR)
- ✓ Vitamine PP : 9 mg (57 % des AJR)
- ✓ Vitamine B5 : 3 mg (50 % des AJR)
- ✓ Vitamine B6 : 1 mg (71% des AJR)
- ✓ Vitamine B12 : 0,5 mg (20 % des AJR)
- ✓ Sodium : 745 mg
- ✓ Potassium : 252 mg
- ✓ Magnésium : 30 mg
- ✓ Sélénium : 6 µg

- *Conseils d'utilisation*

- ✓ 500 g de poudre = Volume pour 11 bidons de 500 mL
- ✓ 1,5 dosettes (50 g) => bidon de 750 mL
- ✓ 1 dosettes (33 g) => bidon de 500 mL

À consommer le plus régulièrement possible pendant l'effort, *idéalement 1 à 2 pleines gorgées toutes les 10 minutes.*

c) **Boisson Inergy Malto**® – poudre : 500 g – saveurs citron ou neutre

- ✓ Contribue à l'apport énergétique
- ✓ Action antioxydante
- ✓ Contribue à réduire la fatigue

- *Boisson énergétique pour les efforts de longue durée (+ 4 h)*

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 100 g*

- ✓ Valeur énergétique : 367 Kcal
- ✓ Protéines : traces
- ✓ Glucides : 97,1 g (dont sucres : 9,9 g)
- ✓ Lipides : traces
- ✓ Fibres : traces
- ✓ Vitamine C : 30 mg (38 % des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,7 mg (64% des AJR)
- ✓ Vitamine B2 : 0,8 mg (57 % des AJR)
- ✓ Vitamine B6 : 1 mg (71 % des AJR)
- ✓ Sodium : 736 mg
- ✓ Potassium : 188 mg
- ✓ Magnésium : 30 mg

- *Conseils d'utilisation*

- ✓ 500 g = Volume pour 15 bidons de 500 mL

À consommer le plus régulièrement possible pendant l'effort *idéalement 1 à 2 pleines gorgées toutes les 10 minutes.*

d) **Dosettes Inergy**® - boîtes de 10 dosettes - saveurs cola ou orange

- ✓ Spécifique pour les efforts modérés
- ✓ Contient du ginseng énergisant
- ✓ Maximise le potentiel énergétique

- *Dosettes performances*

La dosette est recommandée pour maximiser les performances physiques et le potentiel énergétique.

Elle associe :

- un complexe spécifique d'hydrates de carbone (sirop de glucose, maltodextrine, fructose) ;
- du ginseng qui exerce une activité tonique générale sur l'organisme ;
- des vitamines (B1, B2, B6, B9), indispensables au fonctionnement optimal du métabolisme énergétique ;
- du cuivre et du manganèse aux effets antioxydants.

- *Informations nutritionnelles moyennes par dosette*

- ✓ Valeur énergétique : 74 Kcal
- ✓ Protéines : traces
- ✓ Glucides : 18 g (dont sucres : 11 g)
- ✓ Lipides : traces
- ✓ Fibres : traces
- ✓ Sodium : 0 g
- ✓ Gelée royale : 25 mg
- ✓ Ginseng : 25 mg
- ✓ Vitamine B6 : 1 mg (71 % des AJR)
- ✓ Vitamine B2 : 0,8 mg (57% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,2 mg (18% des AJR)
- ✓ Vitamine B9 : 100 µg (50 % des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

À prendre au cours de l'effort, à raison de 1 à 2 tubes par jour.

e) **Dosettes Red Blaster** ® - boîtes de 10 dosettes – saveurs citron ou fruits rouge

- ✓ Action survitalisante
- ✓ Contient du guarana énergisant
- ✓ Contribue à améliorer les performances

- *Dosettes des efforts intenses*

Pour apporter un concentré d'énergie lors des efforts intenses, grâce à sa teneur en vitamines du groupe B et au complexe de plantes : maté, guarana, éleuthérocoque et gingembre.

La dosette Red Blaster ® associe :

- un complexe spécifique d'hydrates de carbone, à assimilation rapide (sirop de glucose, saccharose).
- du guarana, du maté pour améliorer les performances.
- de l'éleuthérocoque pour favoriser la résistance à l'effort physique. Il est également reconnu pour stimuler le fonctionnement du système immunitaire.
- du gingembre, réputé pour son action survitalisante.
- des vitamines indispensables au métabolisme énergétique.

- *Informations nutritionnelles moyennes par dosette*

- ✓ Valeur énergétique : 73 Kcal
- ✓ Protéines : traces
- ✓ Glucides : 18,25 g (dont sucres : 14,25 g)
- ✓ Lipides : traces
- ✓ Sodium : traces
- ✓ Fibres : traces
- ✓ Magnésium : 33 mg
- ✓ Extrait de gingembre : 15 mg
- ✓ Extrait de cola : 12,5 mg
- ✓ Extrait de guarana : 12,5 mg
- ✓ Extrait d'éleuthérocoque : 12,5 mg
- ✓ Extrait de maté : 12 mg
- ✓ Vitamine C : 30 mg (38 % des AJR)
- ✓ Vitamine PP : 9 mg (56 % des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,2 mg (18 % des AJR)

- ✓ Vitamine B8 : 75 µg (150% des AJR)
- ✓ Vitamine B12 : 0,5 µg (20% des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

A prendre au cours de l'effort, durant la *phase finale* à raison de 1 à 2 tubes par jour.

f) Dosettes Myo Control® - boites de 10 dosettes – saveur orange/mangue

- ✓ Aide au bon fonctionnement musculaire
- ✓ Action antioxydante
- ✓ Contribue à réduire la fatigue

- *Dosettes facilitant la décontraction musculaire*

Pour favoriser la décontraction musculaire pendant l'effort, la dosette associe :

- du Powergrape® (extrait de Raisin) et de la riboflavine (Vitamine B2) connus pour leur action antioxydante.
- un complexe de vitamines et minéraux (B1, B2, B3, B6, B9 et magnésium) qui garanti aux sportifs un apport énergétique tout au long de l'effort.

- *Informations nutritionnelles moyennes par dosette*

- ✓ Valeur énergétique : 69 Kcal
- ✓ Protéines : traces
- ✓ Glucides : 17,2 g (dont sucres : 11,6 g)
- ✓ Lipides : traces
- ✓ Fibres : traces
- ✓ Magnésium : 57 mg
- ✓ PowerGrape® (extrait de raisin) : 200 mg
- ✓ Vitamine B3 : 2 mg
- ✓ Vitamine B6 : 0,18 mg
- ✓ Vitamine B2 : 0,18 mg
- ✓ Vitamine B1 : 0,14 mg
- ✓ Vitamine B9 : 25 µg

- *Conseils d'utilisation*

À prendre *juste avant et/ou au cours de l'effort*, à raison de 2 à 4 tubes par jour.

Peut-être associé aux dosettes Inergy ® et/ou Red Blaster ® pour un apport énergétique maximal au cours de l'effort.

g) **Barres Inergy** ® - boîtes de 12 ou 36 barres – saveurs fruits du verger ou fruits rouge

- ✓ Plus de 60% de glucides
- ✓ Complexe antioxydant
- ✓ Contient du guarana (énergisant)
- ✓ Sans huile de palme

- *Barres énergétiques de l'effort*

Anti coups de pompe, avec plus de 63% de glucides, elles apportent toute l'énergie nécessaire pendant la course ou la compétition.

- *Informations nutritionnelles moyennes par barre*

- ✓ Valeur énergétique : 127 Kcal
- ✓ Lipides : 1 g (dont AGS : 0,1 g)
- ✓ Glucides : 27,5 g (dont sucres : 13,5 g)
- ✓ Fibres : 2,3 g
- ✓ Protéines : 1,6 g
- ✓ Sodium : 0,04 g
- ✓ Magnésium : 99 mg
- ✓ Sélénium : 18 µg
- ✓ Guarana : 100 mg (dont caféine : 12 mg)
- ✓ Vitamine A : 264 µg (33 % des AJR)
- ✓ Vitamine E : 3,5 mg (29 % des AJR)
- ✓ Vitamine C : 20 mg (25 % des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,2 mg (18 % des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

A consommer avant ou pendant l'effort.

3. Après l'effort

a) **Boisson Inergy Post effort**® - poudre : 500 g

- ✓ Protège les cellules contre le stress oxydatif
- ✓ Contribue à réduire la fatigue

- *Boisson post-effort*

Boisson de récupération alcaline isotonique post-effort, elle est enrichie en protéines, vitamines et minéraux et apporte les nutriments nécessaires à une meilleure récupération de l'organisme.

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 100 g*

- ✓ Valeur énergétique : 361 Kcal
- ✓ Protéines : 19,8 g
- ✓ Glucides : 69,4 g (dont sucres : 15,3 g)
- ✓ Lipides : 0,5 g (dont AGS : 0,1 g)
- ✓ Fibres : 0,3 g
- ✓ Vitamine A : 2095 µg (262 % des AJR)
- ✓ Vitamine E : 30 mg (250 % des AJR)
- ✓ Vitamine C : 120 mg (150% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,66 mg (60 % des AJR)
- ✓ Vitamine B2 : 3,2 mg (229 % des AJR)
- ✓ Vitamine PP : 36 mg (225 % des AJR)
- ✓ Vitamine B5 : 12 mg (200 % des AJR)
- ✓ Vitamine B6 : 4 mg (286 % des AJR)
- ✓ Vitamine B8 : 140 µg (285 % des AJR)
- ✓ Vitamine B9 : 400 µg (200 % des AJR)
- ✓ Vitamine B12 : 2 µg (80 % des AJR)
- ✓ Powergrape® (extrait de raisin) : 200 mg
- ✓ Super Oxyde Dismutase : 200 UI
- ✓ Calcium : 472 mg (59 % des AJR)
- ✓ Sodium : 59 mg
- ✓ Potassium : 261 mg
- ✓ Phosphore : 216 mg (31 % des AJR)
- ✓ Magnésium : 319 mg (85 % des AJR)
- ✓ Zinc : 15 mg (150 % des AJR)

- ✓ Cuivre : 0,09 mg
- ✓ Manganèse : 5,7 mg (286 % des AJR)
- ✓ Sélénium : 72 µg (131 % des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

À consommer jusqu'à 1h30 après l'effort. [105]

C. Gamme STC Nutrition (laboratoire INELDEA)

1. Avant l'effort

a) *Breakfast Multisports*® – poudre : 400 g – Saveur cappuccino

- ✓ Apporte les carburants indispensables à la production d'énergie
- ✓ Vitamines, minéraux

- *Petit déjeuner multisports*

Pour les efforts intenses et de longue durée :

- ✓ Riche en glucides, pour apporter de l'énergie avant l'effort.
- ✓ Riche en protéines, qui contribuent au maintien de la masse musculaire.
- ✓ Riche en calcium, qui participe à la fonction musculaire et au métabolisme énergétique.
- ✓ Riche en vitamines A, E, C, B1, B2, PP, B5, B6, B8, B9, B12 qui soutiennent le métabolisme énergétique et aident à réduire la fatigue.

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 45 g*

- ✓ Valeur énergétique : 158 Kcal
- ✓ Protéines : 16,6 g
- ✓ Glucides : 20,8 g (dont sucres : 17,6 g)
- ✓ Lipides : 0,5 g (dont AGS : 0,2 g)
- ✓ Fibres : 3,6 g
- ✓ Vitamine A : 400 µg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine C : 40 mg (50% des AJR)

- ✓ Vitamine E : 6 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,55 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B2: 0,7 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B3 (PP) : 8 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B5 : 3 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B6 : 0,7 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B8 : 25 µg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B9 : 100 µg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B12 : 1,25 µg (50% des AJR)
- ✓ Calcium : 246 mg (31% des AJR)
- ✓ Chrome : 10 µg (25% des AJR)
- ✓ Cuivre : 14 µg (14% des AJR)
- ✓ Fer : 1,6 mg (11% des AJR)
- ✓ Magnésium : 19 mg (5% des AJR)
- ✓ Manganèse : 0,15 mg (7% des AJR)
- ✓ Molybdène : 50 µg (100% des AJR)
- ✓ Phosphore: 222 mg (32% des AJR)
- ✓ Potassium : 205 mg (10% des AJR)
- ✓ Sélénium : 25 µg (45% des AJR)
- ✓ Sodium : 192 mg
- ✓ Zinc : 1,2 mg (12% des AJR)

- *Conseils d'utilisations*

- ✓ 450 g = 10 préparations

A mélanger, de préférence au shaker : 45 g (3 cuillères doseuses bombées) dans 150 mL pour une texture crémeuse ou 200 mL pour une texture veloutée, d'eau ou de lait écrémé froids.

- *Idéal au petit-déjeuner en période d'entraînement, avant une épreuve sportive* ou un entraînement de durée moyenne, lors de trekkings ou raids, ou *entre 2 compétitions* au cours d'une même journée.

- *Jusqu'à 1h avant le départ* ou comme collation énergétique.

b) **Brownie multisports** ® – boîte de 400 g

- ✓ Assimilation optimale
- ✓ Énergie longue durée

- *Gâteau énergétique haute performance*

Spécialement élaboré pour :

- ✓ Apporter de l'énergie avant l'effort grâce aux glucides, sans lourdeurs digestives.
- ✓ Source de protéines, qui contribuent au maintien de la masse musculaire.
- ✓ Source de potassium et de magnésium, qui participent à la fonction musculaire.
- ✓ Riche en vitamine B1, qui soutient le métabolisme énergétique.
- ✓ Riche en fer, impliqué dans le transport de l'oxygène dans l'organisme et qui aide à réduire la fatigue.
- ✓ Contient également des triglycérides à chaînes moyennes (TCM).

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 1/2 brownie (200 g)*

- ✓ Valeur énergétique : 776,5 Kcal
- ✓ Protéines : 31,6 g
- ✓ Glucides : 121,5 g (dont sucres : 76 g)
- ✓ Lipides 17,2 g (dont AGS : 9,7 g)
- ✓ Fibres : 12,7 g
- ✓ Phosphatidylcholine : 1400 mg
- ✓ Sodium : 570 mg
- ✓ Phosphore : 430 mg (62% des AJR)
- ✓ Potassium : 1168 mg (58% des AJR)
- ✓ Calcium : 208 mg (26% des AJR)
- ✓ Magnésium : 186 mg (50% des AJR)
- ✓ Fer : 11,2 mg (80% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 2,2 mg (200% des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

Le brownie se conserve jusqu'à 3 jours après cuisson ou peut-être immédiatement congelé pour une consommation ultérieure.

En fonction de la durée et de l'intensité de l'effort, *consommer ¼ à ½ brownie*, par petites bouchées avec une boisson, *jusqu'à une heure avant le départ*.

Il peut également être consommé comme en-cas énergétique au cours de trekkings ou de raids et entre 2 compétitions au cours d'une même journée.

2. Pendant l'effort

a) *Mineral Drink*® - Bouteille de 500 mL - Saveurs Orange ou Citron

- ✓ Boisson isotonique minéralisante
 - ✓ Prête à boire, énergie immédiate et prolongée
 - ✓ Maltodextrines + Fructose + Glucose + Vitamines + Electrolytes
- *Boisson énergétique isotonique de l'effort d'apport glucidique, enrichie en vitamines*

Spécialement élaboré pour :

- ✓ Apporter de l'énergie sous forme de glucides à assimilation progressive (maltodextrines + glucose + fructose) et des électrolytes dans de bonnes proportions : les solutions de glucides et d'électrolytes accroissent l'absorption d'eau durant l'exercice physique pour une hydratation optimale, et contribuent à maintenir la performance au cours des exercices d'endurance prolongés.
 - ✓ Riche en vitamines C, B1, B2, B5, B6, B12 qui soutiennent le métabolisme énergétique et aident également à réduire la fatigue.
- *Informations nutritionnelles moyennes pour une bouteille (500 ml)*
 - ✓ Valeur énergétique : 120 Kcal
 - ✓ Protéines : 0 g
 - ✓ Glucides : 30 g
 - ✓ Lipides : 0 g

- ✓ Sodium : 230 mg
- ✓ Phosphore : 40 mg (6% des AJR)
- ✓ Chlorure : 165 mg (20% des AJR)
- ✓ Potassium : 146 mg (7% des AJR)
- ✓ Calcium : 100 mg (12% des AJR)
- ✓ Magnésium : 25 mg (7% des AJR)
- ✓ Vitamine C : 40 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,55 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B2 : 0,7 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B5 : 3 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B6 : 0,7 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B12 : 1,25 µg (50% des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

A consommer par petites gorgées à raison de 1 à 2 bouteilles par jour, particulièrement pendant un effort physique modéré.

b) **VO2 MAX**® - Boîte filmée de 12 sachets de 35 g – saveurs orange ou fruits rouges

- ✓ Spécial endurance : efforts de longue durée
 - ✓ Hydrates de carbone + Protéines de lactosérum + Vitamines + Electrolytes
 - ✓ Energie + Hydratation + Maintien des muscles et de la performance
 - ✓ pH neutre – Isotonique
- *Préparation pour boisson énergétique isotonique de l'effort d'apport glucidique enrichie en vitamines*
 - ✓ Les solutions de glucides et d'électrolytes accroissent l'absorption d'eau durant l'exercice physique pour une hydratation optimale, et contribuent à maintenir la performance au cours des exercices d'endurance prolongés.
 - ✓ Source de protéines, qui contribuent au maintien de la masse musculaire.

- ✓ Source de vitamines A, E, C, B1, B2, PP, B5, B6, B8, B9, B12 qui soutiennent le métabolisme énergétique et aident à réduire la fatigue.
 - ✓ Riche en sélénium, qui contribue à protéger les cellules contre le stress oxydatif.
- *Informations nutritionnelles moyennes par sachet (35 g)*
 - ✓ Valeur énergétique : 125 Kcal
 - ✓ Protéines : 6,5 g
 - ✓ Glucides : 24 g (dont sucres : 11 g)
 - ✓ Lipides : 0,1 g (dont AGS : 0 g)
 - ✓ Fibres : 1 g
 - ✓ Calcium : 51 mg (6% des AJR)
 - ✓ Chrome : 2,5 µg (6% des AJR)
 - ✓ Cuivre : 0,025 mg (2,5% des AJR)
 - ✓ Magnésium : 18 mg (5% des AJR)
 - ✓ Manganèse : 0,025 mg (1,3% des AJR)
 - ✓ Molybdène : 12,2 µg (24,5% des AJR)
 - ✓ Phosphore : 26,8 mg (4% des AJR)
 - ✓ Potassium : 112 mg (5,5% des AJR)
 - ✓ Sélénium : 12,5 µg (23% des AJR)
 - ✓ Sodium : 0,135 g
 - ✓ Zinc : 0,025 mg (0,25% des AJR)
 - ✓ Vitamine A : 200 µg (25% des AJR)
 - ✓ Vitamine C : 15,1 mg (19% des AJR)
 - ✓ Vitamine E : 2,45 mg (20,5% des AJR)
 - ✓ Vitamine B1 : 0,35 mg (32% des AJR)
 - ✓ Vitamine B2 : 0,38 mg (27,5% des AJR)
 - ✓ Vitamine B3 (PP) : 4,5 mg (28,5% des AJR)
 - ✓ Vitamine B5 : 1,5 mg (25% des AJR)
 - ✓ Vitamine B6 : 0,5 mg (35% des AJR)
 - ✓ Vitamine B8 : 37,4 µg (75% des AJR)
 - ✓ Vitamine B9 : 50 µg (25% des AJR)
 - ✓ Vitamine B12 : 0,25 µg (10% des AJR)

- *Conseils et recommandations*

Diluer 35 g (1 sachet) dans 500 mL d'eau pour reconstituer une boisson isotonique. La dilution peut être adaptée à la température ambiante : si $< 10^{\circ}\text{C}$, diluer 35 g dans 400 ml (boisson légèrement hypertonique) ; si $> 25^{\circ}\text{C}$, diluer 35 g dans 750 ml (boisson hypotonique). Agiter jusqu'à complète dissolution.

Consommer *pendant l'effort* par petites gorgées *toutes les 10-15 minutes* à raison d'environ *500 ml par heure d'exercice*, puis *500 ml immédiatement à la fin de l'épreuve*.

Il est recommandé de *ne pas consommer plus de 2 sachets par jour*.

c) **Energy Fruits Bar®** - Boite de 24 barres de 30 g – saveurs fruits

- ✓ Extrait de Maca
- ✓ Vitamines
- ✓ 35% de fruits secs

- *Barre énergétique de l'effort d'apport glucidique aux fruits*

Energy Fruits Bar® est une barre énergétique dynamisante, à base de fruits, concentrée en glucides et enrichie en vitamines et en extrait de Maca (effet dynamisant et soutenant la performance physique et mentale).

- *Informations nutritionnelles moyennes par barre (30 g)*

- ✓ Valeur énergétique : 98 Kcal
- ✓ Protéines : 1,0 g
- ✓ Glucides totaux : 21 g (dont sucres : 9,2 g)
- ✓ Lipides : 0,6 g
- ✓ Fibres : 2,6 g
- ✓ Sodium : 15 mg
- ✓ Vitamine C : 6 mg (7,5% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,21 mg (19% des AJR)
- ✓ Maca : 210 mg

- *Conseils d'utilisation*

A consommer par *petites bouchées pendant l'effort* pour un apport immédiat en énergie, à raison de 1 à 5 barres par jour, *en complément d'un produit d'hydratation*.

d) **Malto Power**® - poudre : 500 g – goût neutre

- ✓ Maltodextrines + Vitamines
- ✓ Energie + Hydratation + Maintien de la performance

- *Préparation pour boisson énergétique de l'effort d'apport glucidique enrichie en vitamines*

Spécialement élaboré pour apporter de l'énergie sous forme de glucides à assimilation prolongée (maltodextrines) et des électrolytes dans de bonnes proportions :

- ✓ Les solutions de glucides et d'électrolytes accroissent l'absorption d'eau durant l'exercice physique pour une hydratation optimale, et contribuent à maintenir les performances au cours des exercices d'endurance prolongés.
- ✓ Source de vitamines B1, B6, B12 qui soutiennent le métabolisme énergétique et de vitamines B6 et B12 qui aident également à réduire la fatigue.

- *Informations nutritionnelles moyennes pour 50 g*

- ✓ Valeur énergétique : 186 Kcal
- ✓ Protéines : 0 g
- ✓ Glucides totaux : 44,4 g (dont sucres : 3,3 g)
- ✓ Lipides : 0 g
- ✓ Fibres: 2 g
- ✓ Ferments lactiques : 1 MUI
- ✓ Sodium : 347 mg
- ✓ Vitamines B1 : 0,28 mg (25% des AJR)
- ✓ Vitamines B6 : 0,35 mg (25% des AJR)
- ✓ Vitamines B12 : 0,63 µg (25% des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

Diluer 50 g (4 cuillères doseuses) dans 750 mL d'eau (un bidon). Mélanger jusqu'à complète dissolution.

- *En préparation à l'effort : dans les 3 jours précédant l'effort*, boire idéalement 2 à 3 bidons par jour, par petites gorgées tout au long de la journée.

- *Pendant les efforts intenses ou de longue durée* : Malto Power ® constitue un soutien énergétique supplémentaire aux boissons Isotonic Power ® ou VO2 MAX ®, pour les dépenses caloriques importantes. Boire 2 à 3 gorgées de Malto Power ® toutes les 10 min en prévision des difficultés.

- Il peut être mélangé directement à la boisson Isotonic Power ® ou VO2 MAX ® à raison de 64 g d'Isotonic Power ® (4 cuillères doseuses) ou 87,5 g de VO2 MAX ® (5 cuillères doseuses) + 12,5 g de Malto Power ® (1 cuillère doseuse) dans 750 mL d'eau, à consommer par petites gorgées toutes les 10-15 minutes, à raison d'environ 500 mL par heure d'exercice.

e) **Isotonic Power ®** - Poudre 525 g – Saveur citron ou menthe

- ✓ Dextrose + Maltodextrines + Fructose
- ✓ À l'extrait de guarana
- ✓ À l'extrait de raisin Powergrape®

- *Préparation pour boisson énergétique isotonique de l'effort d'apport glucidique enrichie en vitamines, aux extraits de guarana et de raisin*

Il est spécialement élaboré pour apporter de l'énergie sous forme de glucides à assimilation progressive (dextrose + maltodextrines + fructose) et des électrolytes dans de bonnes proportions :

- ✓ Les solutions de glucides et d'électrolytes accroissent l'absorption d'eau durant l'exercice physique pour une hydratation optimale, et contribuent à maintenir les performances au cours des exercices d'endurance prolongés.

- ✓ Source de vitamines C et B1 : la vitamine B1 soutient le métabolisme énergétique ; la vitamine C aide à réduire la fatigue.
- ✓ L'extrait de guarana soutient la vitalité physique et mentale.
- ✓ L'extrait de raisin Powergrape® aide à protéger les cellules du stress oxydatif et à réduire les sensations de lourdeurs dans les jambes.

- *Informations nutritionnelles moyennes par dose (40g)*

- ✓ Valeur énergétique : 148 Kcal
- ✓ Protéines : 0 g
- ✓ Glucides : 36,9 g (dont sucres : 21 g)
- ✓ Lipides : 0 g
- ✓ Fibres : 0 g
- ✓ Calcium: 35 mg (4% des AJR)
- ✓ Magnésium: 20 mg (5% des AJR)
- ✓ Potassium : 24 mg (1% des AJR)
- ✓ Sodium : 233 mg
- ✓ Vitamine C : 16 mg (20% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,22 mg (20% des AJR)
- ✓ Extrait de guarana : 80 mg (dont Caféine : 9,6 mg)
- ✓ Extrait de Raisin Powergrape® : 50 mg (dont Polyphénols : 45 mg)
- ✓ Lithothamne : 50 mg

- *Conseils d'utilisation*

Diluer 40 g (2,5 cuillères-doseuses) dans 500 mL d'eau (ou 3 cuillères-doseuses si température < 25°C, et 4 cuillères-doseuses si température < 10°C). Remuer jusqu'à complète dissolution, puis consommer *pendant l'effort* par petites gorgées *toutes les 10-15 minutes* (à raison d'environ 500 mL par heure d'exercice), puis 500 mL immédiatement à la fin de l'épreuve.

f) **VO2 Max bar**® – boîtes de 12 barres de 45 g – saveurs bananes et chocolat

- ✓ Spécial Efforts Longue Durée
- ✓ Carbohydrates + Whey (protéines de lactosérum)

- *Barre énergétique de l'effort d'apport glucidique*

Spécialement élaboré pour :

- ✓ Fournir de l'énergie sous la forme de glucides rapidement assimilables pendant l'effort.
- ✓ Riche en protéines (de lactosérum), qui contribuent au maintien de la masse musculaire.
- ✓ Riche en vitamines A, E, C, D, B1, B2, PP, B5, B6, B8, B9, B12 qui soutiennent le métabolisme énergétique et aident à réduire la fatigue.

- *Informations nutritionnelles moyennes par barre (45 g)*

- ✓ Valeur énergétique : 174 Kcal
- ✓ Protéines : 10,8 g
- ✓ Glucides : 21,6 g
- ✓ Lipides : 4,95 g
- ✓ Fibres : 1,3 g
- ✓ Vitamine A : 400 µg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,55 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B2 : 0,70 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B3 : 8,0 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B5 : 3,0 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B6 : 0,70 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B8 : 25 µg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B9 : 100 µg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine B12 : 1,25 µg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine C : 40 mg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine D : 2,5 µg (50% des AJR)
- ✓ Vitamine E : 6,0 mg (50% des AJR)
- ✓ Magnésium : 193 mg (51% des AJR)

- ✓ Potassium : 257 mg (13% des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

A consommer par petites bouchées *pendant l'effort* pour un apport immédiat en énergie, à raison de *1 à 2 barres par jour, en complément d'un produit d'hydratation*.

g) **OVER BLAST ENERGY®** - Boîte de 25 dosettes de 25 g – saveurs pomme et fruits rouge

- ✓ Gel énergétique de l'effort d'apport glucidique
- ✓ Enrichi en vitamines et minéraux
- ✓ Aux extraits de plantes

- *Gel énergétique haute performance*

Spécialement élaboré à base de glucides rapidement assimilables, mais aussi d'extraits de plantes et vitamines aux effets complémentaires :

- ✓ Les extraits de ginseng et de gingembre ont un effet dynamisant : ils soutiennent l'énergie et la vitalité et améliorent la résistance physiologique de l'organisme dans les conditions sévères.
- ✓ Les vitamines C, B2, B5, B6 aident à réduire la fatigue.

- *Informations nutritionnelles moyennes par dosette (25 g)*

- ✓ Valeur énergétique : 74 Kcal
- ✓ Protéines : traces
- ✓ Glucides : 18,5 g (dont sucres : 12,1 g)
- ✓ Lipides : traces
- ✓ Complexe d'extraits (Panax ginseng, Kola, Propolis, Gingembre) : 120 mg
- ✓ Caféine : 30 mg
- ✓ Chlorures : 90 mg (11% des AJR)
- ✓ Sodium : 45 mg
- ✓ Potassium : 45 mg (2% des AJR)
- ✓ Vitamines C : 20 mg (25% des AJR)
- ✓ Vitamines B1 : 0,22 mg (20% des AJR)

- ✓ Vitamines B2 : 0,40 mg (28% des AJR)
- ✓ Vitamines B5 : 1,50 mg (25% des AJR)
- ✓ Vitamines B6 : 0,30 mg (21% des AJR)
- ✓ Vitamines B12 : 0,25 µg (10% des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

1 à 2 doses par heure à l'entraînement ou en compétition, maximum 6 par jour.

h) OVER BLAST NO CRAMP® - Boîte de 25 dosettes de 25 g – saveur cola

- ✓ Gel énergétique de l'effort d'apport glucidique
- ✓ Enrichi en vitamines et minéraux
- ✓ Aux extraits de plantes

- *Gel énergétique de l'effort d'apport glucidique*

Les crampes peuvent survenir à l'effort en cas de fatigue musculaire, de stress oxydatif, d'une mauvaise hydratation ou d'un apport insuffisant en électrolytes. Le gel est spécialement élaboré à base de glucides rapidement assimilables, mais aussi d'actifs aux effets complémentaires :

- ✓ Le magnésium contribue à une fonction musculaire normale.
- ✓ L'extrait de raisin Powergrape® aide à protéger les cellules du stress oxydatif et à réduire les sensations de lourdeurs dans les jambes.
- ✓ La vitamine B1 participe au métabolisme énergétique.

- *Informations nutritionnelles moyennes par dosette (25 g)*

- ✓ Valeur énergétique : 74 Kcal
- ✓ Protéines : traces
- ✓ Glucides : 18,5 g (dont sucres : 12,1 g)
- ✓ Lipides : traces
- ✓ Powergrape® : 65 mg
- ✓ Lithothamne : 65 mg
- ✓ Calcium : 35 mg (4% des AJR)
- ✓ Sodium : 47 mg

- ✓ Magnésium : 56,25 mg (15% des AJR)
- ✓ Potassium : 23 mg (1% des AJR)
- ✓ Vitamine C : 9 mg (11% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0,18 mg (16% des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

1 à 2 doses par heure à l'entraînement ou en compétition, maximum 6 par jour.

3. Après l'effort

a) **RECUP MAX**® - poudre 525 g – saveur fruits exotiques

- ✓ Boisson de récupération riche en Glucides (Maltodextrines) + Protéines + Antioxydants
- ✓ Au pH basique, avec arginine
- ✓ Riche en magnésium : réduction de la fatigue

- *Préparation pour boisson de récupération d'apport glucidique enrichie en protéines*

Cette boisson aide l'organisme à reconstituer les réserves énergétiques, éliminer les toxines, neutraliser les radicaux libres, maintenir les équilibres acido-basique et électrolytique (minéraux), et réduire la fatigue pour une récupération optimale.

Elle est spécialement élaboré à base de :

- ✓ Glucides à assimilation rapide et progressive (dextrose + maltodextrines) ;
- ✓ Hydrolysate de protéines de lactosérum contenant des BCAA (acides aminés branchés);
- ✓ Arginine, acide aminé qui contribue à éliminer l'ammoniaque, provenant de la dégradation des protéines au cours de l'effort ;
- ✓ Riche en magnésium, qui aide à réduire la fatigue, contribue à la fonction musculaire et à l'équilibre en électrolytes ;
- ✓ Riche en cuivre et manganèse, qui aident à protéger les cellules du stress oxydatif.

- *Informations nutritionnelles moyennes par portion (40 g)*

- ✓ Valeur énergétique : 137 Kcal
- ✓ Protéines : 4,3 g (dont BCAA (leucine, isoleucine, valine) : 948 mg)
- ✓ Glucides totaux : 29,4 g (dont sucres: 13,8 g)
- ✓ Lipides : 0,2 g
- ✓ Fibres : 0 g
- ✓ Glutamine : 350 mg
- ✓ Arginine : 350 mg
- ✓ Extrait de figue de Barbarie : 800 mg
- ✓ Calcium : 95 mg (12% des AJR)
- ✓ Cuivre : 0,3 mg (30% des AJR)
- ✓ Magnésium : 96 mg (25% des AJR)
- ✓ Manganèse : 0,60 mg (30% des AJR)
- ✓ Potassium : 81 mg (4% des AJR)
- ✓ Provitamine A : 128 µg (16% des AJR)
- ✓ Vitamine B1 : 0.22 mg (20% des AJR)

- *Conseils d'utilisation*

Diluer 40 g (2,5 cuillères-doseuses) dans 500 mL d'eau. Remuer jusqu'à complète dissolution, puis *consommer par petites gorgées le plus tôt possible après la fin de l'effort.*
[106]

III. Limites avec le dopage

A. Généralités

Le pharmacien doit être vigilant face aux demandes des sportifs. Il est primordial de rappeler aux patients qu'une alimentation bien équilibrée est généralement suffisante et que l'augmentation des performances par une prise de compléments alimentaires est souvent illusoire. Face à des conduites abusives, pouvant amener surdosages, voire dopage, le rôle de prévention de l'officinal trouve toute sa place, dans un conseil raisonné et adapté.

Certaines substances disposent d'un potentiel addictogène propre (comme les stupéfiants), alors que d'autres n'entraînent pas de pharmacodépendance, mais sont surtout utilisés dans un contexte addictif. La dépendance survient chez des sujets présentant des

facteurs de vulnérabilité psychologique (troubles somatiques ou psychiques pendant l'enfance, événements de vie traumatiques, dépression...), ce d'autant que le début des consommations a été précoce et qu'elles entrent dans une spirale cognitivo-comportementale où l'automédication devient une habitude en raison de l'effet renforçateur d'une victoire obtenue sous produit. [107]

B. Définition du dopage

La commission médicale du Comité international olympique (CIO) définit le dopage comme :

« l'utilisation de substances ou de procédés de nature à modifier artificiellement les capacités de l'organisme ou à masquer l'emploi de substances ou de procédés ayant cette propriété ».

Une liste des substances et des procédés interdits à tout sportif en compétition ou hors compétition est mise à jour chaque année. Le pharmacien doit connaître cette liste et savoir l'interpréter afin de participer à la lutte contre le dopage et de renseigner ses patients sportifs, professionnels ou amateurs.

Tout sportif licencié peut subir un contrôle antidopage avant, pendant ou après la compétition, ou lors d'un entraînement y préparant. [109]

C. Dopage et compléments alimentaires

Une grande partie des compléments alimentaires disponibles sur le marché français respecte la législation française. Cependant, l'extension de la mode des compléments alimentaires et des produits diététiques, l'absence de normes européennes en dehors des vitamines et des minéraux, la libéralisation extrême de ce marché aux États-Unis, facilitent le contournement de la réglementation. Ce contournement s'opère notamment par la vente sur Internet et le démarchage à domicile, dans les clubs sportifs et les centres de remise en forme, par des réseaux nationaux ou transfrontaliers, organisés et structurés. Le marché des compléments alimentaires et des produits diététiques est devenu ainsi un secteur gangrené par une économie souterraine dont une frange incontrôlée constitue un vecteur de dopage. [108]

D. Substances interdites

Liste des interdictions 2013 du Code Mondial Antidopage

En conformité avec l'article 4.2.2 du Code mondial antidopage, toutes les substances interdites doivent être considérées comme des « substances spécifiées » sauf les substances dans les classes S1, S2, S4.4, S4.5, S6.a, et les *méthodes interdites* M1, M2 et M3.

❖ SUBSTANCES ET MÉTHODES INTERDITES EN PERMANENCE (PENDANT ET HORS COMPÉTITION)

➤ SUBSTANCES INTERDITES

S0. SUBSTANCES NON APPROUVEES

Toute substance pharmacologique non incluse dans une section de la *Liste* ci-dessous et qui n'est pas actuellement approuvée pour une utilisation thérapeutique chez l'homme par une autorité gouvernementale réglementaire de la santé (médicaments en développement préclinique ou clinique ou qui ne sont plus disponibles, médicaments à façon, substances approuvées seulement pour usage vétérinaire) est interdite en permanence.

S1. AGENTS ANABOLISANTS

Les agents anabolisants sont interdits.

1. Stéroïdes anabolisants androgènes (SAA)

a. SAA exogènes¹ (liste non exhaustive) :

1-androstènediol ; 1-androstènedione ; bolandiol ; bolastérone ; boldénone ; boldione ; calustérone ; clostébol ; danazol ; déhydrochlorméthyltestostérone ; désoxyméthyltestostérone ; méthylnortestostérone ; nandrolone ; quinbolone ; 1-testostérone ; trenbolone ; et autres substances possédant une structure chimique similaire ou un (des) effet(s) biologique(s) similaire(s).

¹ « exogène » désigne une substance qui ne peut pas être habituellement produite naturellement par l'organisme humain.

b. SAA endogènes² par administration exogène (liste non exhaustive) :

androstènediol ; androstènedione ; dihydrotestostérone ; testostérone ; 19-norandrostérone...

2. Autres agents anabolisants, incluant sans s'y limiter :

Clenbutérol, modulateurs sélectifs des récepteurs aux androgènes (SARMs), tibolone, zéranol, zilpatérol.

S2. HORMONES PEPTIDIQUES, FACTEURS DE CROISSANCE ET SUBSTANCES APPARENTÉES

Les substances qui suivent et leurs facteurs de libération sont interdits :

1. Agents stimulants l'érythropoïèse [érythropoïétine (EPO), darbépoétine (dEPO), méthoxypolyéthylène glycol-époétine bêta (CERA), péginasatide (Hématide), stabilisateurs de facteurs inductibles par l'hypoxie (HIF)] ;

2. Gonadotrophine chorionique (CG) et hormone lutéinisante (LH), interdites chez le sportif de sexe masculin seulement ;

3. Corticotrophines ;

4. Hormone de croissance (GH), facteur de croissance analogue à l'insuline-1 (IGF-1), facteur de croissance dérivé des plaquettes (PDGF), facteur de croissance endothélial vasculaire (VEGF), facteur de croissance des hépatocytes (HGF), facteurs de croissance fibroblastiques (FGF), facteurs de croissance mécaniques (MGF), ainsi que tout autre facteur de croissance influençant dans le muscle, le tendon ou le ligament, la synthèse/dégradation protéique, la vascularisation, l'utilisation de l'énergie, la capacité régénératrice ou le changement du type de fibre ; et autres substances possédant une structure chimique similaire ou un (des) effet(s) biologique(s) similaire(s).

² « endogène » désigne une substance qui peut être produite naturellement par l'organisme humain.

S3. BÊTA-2 AGONISTES

Tous les bêta-2 agonistes, y compris tous leurs isomères optiques (*d*- et *l*-) s'il y a lieu sont interdits, sauf le salbutamol inhalé (maximum 1 600 microgrammes par 24 heures), le formotérol inhalé (dose maximale délivrée de 54 microgrammes par 24 heures) et le salmétérol administré par inhalation conformément aux schémas d'administration thérapeutique recommandés par les fabricants.

La présence dans l'urine de salbutamol à une concentration supérieure à 1 000 ng/mL ou de formotérol à une concentration supérieure à 40 ng/mL sera présumée ne pas être une utilisation thérapeutique intentionnelle et sera considérée comme un *résultat d'analyse anormal*, à moins que le *sportif* ne prouve par une étude de pharmacocinétique contrôlée que ce résultat anormal est bien la conséquence de l'usage d'une dose thérapeutique par inhalation jusqu'à la dose maximale indiquée ci-dessus.

S4. MODULATEURS HORMONAUX ET MÉTABOLIQUES

Les substances suivantes sont interdites :

1. Inhibiteurs d'aromatase, incluant sans s'y limiter : aminoglutéthimide, anastrozole, androstatriènedione), exémestane, formestane, létrozole, testolactone...

2. Modulateurs sélectifs des récepteurs aux œstrogènes (SERM), incluant sans s'y limiter : raloxifène, tamoxifène, torémifène.

3. Autres substances anti-oestrogéniques, incluant sans s'y limiter : clomifène, cyclofénil, fulvestrant.

4. Agents modificateurs de(s) la fonction(s) de la myostatine, incluant sans s'y limiter : **les inhibiteurs de la myostatine.**

5. Modulateurs métaboliques :

a) Insulines ;

b) Les agonistes du récepteur activé par les proliférateurs de peroxyosomes δ (PPAR δ)

S5. DIURÉTIQUES ET AUTRES AGENTS MASQUANTS

Les agents masquants sont interdits. Ils incluent :

Diurétiques, desmopressine, probénécide, succédanés de plasma (par ex. glycérol ; administration intraveineuse d'albumine, dextran, hydroxyéthylamidon et mannitol), et autres substances possédant un (des) effet(s) biologique(s) similaire(s).

L'administration locale de la félypressine en anesthésie dentaire n'est pas interdite.

Les diurétiques incluent :

Acétazolamide, amiloride, bumétanide, canrénone, chlortalidone, acide étacrynique, furosémide, indapamide, métolazone, spironolactone, thiazides (bendrofluméthiazide, chlorothiazide, hydrochlorothiazide), triamterène, et autres substances possédant une structure chimique similaire ou un (des) effet(s) biologique(s) similaire(s) (sauf la drospérinone, le pamabrome et l'administration topique de dorzolamide et brinzolamide, qui ne sont pas interdits).

L'usage *en compétition*, et *hors compétition* si applicable, de toute quantité d'une substance étant soumise à un niveau seuil (c'est-à-dire formotérol, salbutamol, cathine, éphédrine, méthyléphédrine et pseudoéphédrine) conjointement avec un diurétique ou un autre agent masquant requiert la délivrance d'une autorisation d'usage à des fins thérapeutiques spécifique pour cette substance, outre celle obtenue pour le diurétique ou un autre agent masquant.

➤ MÉTHODES INTERDITES

M1. MANIPULATION DE SANG OU DE COMPOSANTS SANGUINS

Ce qui suit est interdit :

1. L'administration ou réintroduction de n'importe quelle quantité de sang autologue, homologue ou hétérologue, ou de globules rouges de toute origine dans le système circulatoire.
2. L'amélioration artificielle de la consommation, du transport ou de la libération de l'oxygène incluant, sans s'y limiter, les produits chimiques perfluorés, l'éfaproxiral et les produits d'hémoglobine modifiée (substituts de sang à base d'hémoglobine, produits à base d'hémoglobines réticulées), mais excluant la supplémentation en oxygène.

3. Toute manipulation intravasculaire de sang ou composant(s) sanguin(s) par des méthodes physiques ou chimiques.

M2. MANIPULATION CHIMIQUE ET PHYSIQUE

Ce qui suit est interdit :

1. La *falsification* ou la tentative de *falsification* dans le but d'altérer l'intégrité et la validité des *échantillons* recueillis lors du *contrôle du dopage*. Cette catégorie comprend, sans s'y limiter, la substitution et/ou l'altération de l'urine (avec des protéases par exemple).

2. Les perfusions intraveineuses et/ou injections de plus de 50 mL par période de 6 heures, sauf celles reçues légitimement dans le cadre d'admissions hospitalières ou lors d'examens cliniques.

M3. DOPAGE GÉNÉTIQUE

Ce qui suit, ayant la capacité potentielle d'améliorer la performance sportive, est interdit :

1. Le transfert de polymères d'acides nucléiques ou d'analogues d'acides nucléiques ;
2. L'utilisation de cellules normales ou génétiquement modifiées.

❖ SUBSTANCES ET MÉTHODES INTERDITES EN COMPÉTITION

Outre les catégories S0 à S5 et M1 à M3 définies ci-dessus, les catégories suivantes sont interdites en compétition :

➤ SUBSTANCES INTERDITES

S6. STIMULANTS

Tous les stimulants, y compris tous leurs isomères optiques (*d-* et *l-*) s'il y a lieu, sont interdits, à l'exception des dérivés de l'imidazole en application topique et des stimulants figurant dans le Programme de surveillance³ 2013.

³ Les substances figurant dans le Programme de surveillance 2013 (*bupropion, caféine, nicotine, phényléphrine, phénylpropanolamine, pipradrol, synéphrine*) ne sont pas considérées comme des substances interdites.

Les stimulants incluent :

a : Stimulants non spécifiés :

Adrafinil, amfépramone, amiphénazole, amphétamine, amphétaminil, benfluorex, benzphétamine, benzylpipérazine, bromantan, clobenzorex, cocaïne, cropropamide, crotétamide, diméthylamphétamine, étilamphétamine, famprofazone, fencamine, fenétylline, fenfluramine, fenproporex, furfénorex, méfénorex, méphentermine, mésocarbe, p-méthylamphétamine, méthylènedioxyamphétamine, méthylènedioxyméthamphétamine, modafinil, norfenfluramine, phendimétrazine, phenmétrazine, phentermine, 4-phenylpiracétam (carphédon), prénylamine, prolintane méthamphétamine(d-).

Un stimulant qui n'est pas expressément nommé dans cette section est une substance spécifiée.

b : Stimulants spécifiés (exemples) :

Adrénaline⁴, cathine⁵, éphédrine⁶, étamivan, étiléfrine, fenbutrazate, fencamfamine, heptaminol, isométhéptène, levmetamfétamine, méclofenoxate, méthyléphedrine⁷, méthylhexaneamine (diméthylpentylamine), méthylphenidate, nicéthamide, norfénefrine, octopamine, oxilofrine (méthylsynéphrine), parahydroxyamphétamine, pémoline, pentétrazole, phenprométhamine, propylhexédrine, pseudoéphédrine⁸, sélégiline, sibutramine, strychnine, tuaminoheptane ; et autres substances possédant une structure chimique similaire ou un (des) effet(s) biologique(s) similaire(s).

S7. NARCOTIQUES

Ce qui suit est interdit :

Buprénorphine, dextromoramide, diamorphine (héroïne), fentanyl et ses dérivés, hydromorphone, méthadone, morphine, oxycodone, oxymorphone, pentazocine, péthidine.

⁴ L'usage local (par exemple la voie nasale ou ophtalmologique) de l'adrénaline ou sa co-administration avec les anesthésiques locaux ne sont pas interdits.

⁵ La cathine est interdite quand sa concentration dans l'urine dépasse 5 µg/mL.

⁶ L'éphédrine est interdite quand sa concentration dans l'urine dépasse 10 µg/mL.

⁷ La méthyléphédrine est interdite quand sa concentration dans l'urine dépasse 10 µg/mL.

⁸ La pseudoéphédrine est interdite quand sa concentration dans l'urine dépasse 150 microgrammes par millilitre.

S8. CANNABINOÏDES

Le Δ 9-tétrahydrocannabinol (THC) naturel retrouvé dans le cannabis, le haschisch, la marijuana ou synthétique et les cannabimimétiques tels que le « Spice », le JWH018, le JWH073, le HU-210 sont interdits.

S9. GLUCOCORTICOÏDES

Tous les glucocorticoïdes sont interdits lorsqu'ils sont administrés par voie orale, intraveineuse, intramusculaire ou rectale.

➤ SUBSTANCES INTERDITES DANS CERTAINS SPORTS

P1. ALCOOL

L'alcool (éthanol) est interdit en *compétition* seulement, dans les sports ci-après par leurs fédérations :

- Aéronautique ;
- Automobile ;
- Karaté ;
- Motocyclisme ;
- Motonautique ;
- Tir à l'arc.

Sa détection est effectuée par éthylométrie et/ou analyse sanguine. Le seuil de violation (valeurs hématologiques) est 0,10 g/L.

P2. BÊTA-BLOQUANTS

A moins d'indication contraire, les bêta-bloquants sont interdits en compétition seulement, dans les sports suivants :

- Automobile ;
- Billard (toutes les disciplines) ;
- Fléchettes ;
- Golf ;
- Ski pour le saut à skis, le saut *freestyle/halfpipe* et le *snowboard halfpipe/big air* ;

- Tir (aussi interdits *hors compétition*) ;
- Tir à l'arc (aussi interdits *hors compétition*).

Les bêta-bloquants incluent sans s'y limiter :

Acébutolol, alprénolol, aténolol, bétaxolol, bisoprolol, bunolol, cartéolol, carvédilol, céliprolol, esmolol, labétalol, lévobunolol, métipranolol, métoprolol, nadolol, oxprénolol, pindolol, propranolol, sotalol, timolol. [125]

E. Exemples de dangers et d'effets indésirables des substances dopantes [110]

1. Stéroïdes

- ✓ Acné
- ✓ Perte des cheveux
- ✓ Maladies rénales et cardiaques
- ✓ Sautes d'humeur
- ✓ Agressivité
- ✓ Tendances suicidaires
- *Autres effets possibles pour les hommes :*
 - ✓ Atrophie des testicules
 - ✓ Hypertrophie des seins
 - ✓ Troubles de la libido, impuissance
 - ✓ Diminution de la production de sperme
- *Autres effets possibles chez les femmes :*
 - ✓ Voix plus grave
 - ✓ Poils au visage et sur le corps
 - ✓ Irrégularité menstruelle
 - ✓ Hypertrophie du clitoris

2. Erythropoïétine

- ✓ Epaissement du sang
- ✓ Faiblesse générale
- ✓ Hypertension artérielle

- ✓ Crise cardiaque ou accident vasculaire cérébral (AVC)

3. Stimulants

- ✓ Insomnies
- ✓ Tremblements involontaires
- ✓ Troubles de la coordination et de l'équilibre
- ✓ Anxiété et agressivité
- ✓ Accélération et irrégularité de la fréquence cardiaque
- ✓ Crise cardiaque ou AVC

4. Hormone de croissance

- ✓ Hypertrophie cardiaque, hypertension artérielle, insuffisance cardiaque
- ✓ Troubles rénaux, de la thyroïde et de la vision
- ✓ Arthrite déformante
- ✓ Diurétiques
- ✓ Etourdissements, évanouissements
- ✓ Déshydratation
- ✓ Crampes musculaires
- ✓ Chute de tension artérielle
- ✓ Troubles de la coordination de l'équilibre
- ✓ Confusion et sautes d'humeur
- ✓ Problèmes cardiaques

5. Cannabis

- ✓ Perte de mémoire, d'attention, de motivation et des capacités d'apprentissage
- ✓ Faiblesse du système immunitaire
- ✓ Maladies respiratoires
- ✓ Dépendance psychologique et physique

6. Narcotiques (héroïne, morphine)

- ✓ Faiblesse du système immunitaire
- ✓ Irrégularité de la fréquence cardiaque
- ✓ Défaillance du système respiratoire
- ✓ Perte d'équilibre, de coordination et de concentration
- ✓ Vomissements et constipation
- ✓ Dépendance physique et psychique

F. Modes de consommation

Chez les adolescents, les principales classes de produits consommés aux fins de dopage sportif sont les stimulants, les produits enrichis en protéines (non interdits par le CIO), la créatine (non interdite), les antalgiques (non interdits), le cannabis, les corticoïdes et les stéroïdes anabolisants. Ces substances sont volontiers associées à d'autres produits, notamment alcool, tabac, cocaïne, cannabis, amphétamines ou antalgiques.

Chez les adultes, bien des usagers considèrent que :

- les produits sont efficaces pour améliorer les performances;
- il est nécessaire d'utiliser des produits pour améliorer sa condition physique ;
- les risques pour la santé liés à ces usages sont minimes ;
- les produits sont indispensables, à certains moments, pour gagner en compétition.

Les principales familles de produits interdits consommées sont les stimulants, les stupéfiants (notamment cannabis et cocaïne), les corticoïdes et les stéroïdes anabolisants (surtout testostérone, nandrolone et stanozolol).

La façon de consommer (doses, voie d'administration, durée de prise) varie selon les produits et les individus. Avec les stéroïdes anabolisants, par exemple, on observe, depuis environ 15 ans, une augmentation des doses quotidiennes moyennes (multipliées par 1,5 à 2,5) . Pour la testostérone, on a décrit des doses qui atteignent 500 fois la dose maximale qu'on utiliserait en thérapeutique. Les associations de produits sont fréquentes (stéroïdes anabolisants et clenbutérol, insuline et thyroxine, etc.), voire presque « de règle », (érythropoïétine et fer). [111]

G. Dopage dans les sports d'endurance

La préoccupation essentielle dans toutes les disciplines sportives dites d'endurance (course de fond, ski de fond, cyclisme sur route, triathlon etc.) est d'augmenter le potentiel aérobie. Dans ces conditions, augmenter la capacité sanguine de transfert de l'oxygène représente un atout considérable. D'où l'utilisation pendant un temps du procédé de l'autotransfusion.

Actuellement, l'érythropoïétine recombinante apparaît comme l'agent principal le plus fréquemment utilisé dans ce but. Les glucocorticoïdes, médicaments souvent employés par certains athlètes, possèdent aussi une action hématopoïétique qu'il ne faut pas négliger. Les cytokines (IL3), les fluorocarbures voire l'hémoglobine réticulée, constituent sans doute des candidats potentiels.

Un autre facteur de performance dans les disciplines d'endurance résulte des capacités métaboliques. Divers protocoles pharmacologiques sont utilisés afin d'augmenter la mobilisation des substrats énergétiques et leur récupération. Les produits utilisés ont pour but, durant l'effort de favoriser une mobilisation précoce des lipides (caféine, GH) ainsi qu'une néoglucogenèse accélérée (glucocorticoïdes) et, au cours de la phase de récupération, une restauration rapide des déficits en substrats énergétiques (perfusion de sérum glucosé, insuline, IGF1) et une reconstitution des matériaux protéiques (anabolisants stéroïdiens). [112]

H. Epidémiologie

La prévalence du dopage serait de 3 à 5 % chez les enfants et adolescents sportifs, volontiers plus élevée chez les garçons, les aînés et les compétiteurs. Le recours aux stéroïdes anabolisants, dès l'âge de 8 ans, augmente depuis 1990, surtout chez les filles. Toutes les études soulignent le sentiment de facilité des adolescents de pouvoir se procurer n'importe quel produit interdit.

Chez les amateurs adultes, la prévalence du dopage serait de 5 à 15 %, touchant tous les sports et plus élevée chez les hommes, les 20-25 ans et les 35-39 ans, et les compétiteurs. Les principales substances utilisées sont les stimulants, les stupéfiants, les corticoïdes et les stéroïdes anabolisants. Les associations d'au moins 2 produits sont fréquentes et, depuis environ 15 ans, on observe une augmentation des doses quotidiennes moyennes. Selon les

usagers, les substances sont surtout obtenues sur prescription médicale, sur le marché clandestin et auprès de l'entourage du sportif.

Peu de données éclairent le dopage en dehors du cadre sportif.

Le dopage est bien plus répandu que ne le laissent envisager les résultats des contrôles antidopage. D'autres études sont cependant nécessaires pour en affiner les connaissances épidémiologiques. [113]

Conclusion

La pratique d'un sport d'endurance permet d'améliorer la qualité de vie, la perception de soi, diminue le risque de mort prématurée (en abaissant les risques cardiovasculaires et d'obésité). Le sportif d'endurance est une entité très complexe qui met en jeu la physiologie musculaire, cardiorespiratoire, digestive...

Pour pouvoir bouger, le corps humain a besoin d'énergie. Cette énergie est surtout disponible sous forme d'adénosine triphosphate (ATP) au niveau musculaire, pour permettre la contraction et la relaxation. Cette énergie n'est pas illimitée, il faut sans cesse la régénérer grâce aux différents nutriments.

Pour un sportif d'endurance, le métabolisme le plus « important » est le métabolisme aérobie. Il va permettre de fabriquer beaucoup d'ATP grâce à la glycolyse aérobie et à la lipolyse. Les besoins en oxygène (O_2) augmentent au cours de l'exercice, un ajustement cardio-respiratoire permet d'amener plus d' O_2 au niveau musculaire. La respiration permet de se procurer cet O_2 et de rejeter le dioxyde de carbone (CO_2) produit par l'effort. Celle-ci est ajustée grâce à différents paramètres (température corporelle, statut chimique du sang...), et la consommation maximum en O_2 est caractérisée par la VO_2 max.

Une alimentation équilibrée, comme indiquée dans la pyramide alimentaire suisse, permet d'apporter les nutriments glucidiques, lipidiques, protéiques, vitamines et minéraux en proportion satisfaisante.

Il faut néanmoins quelques ajustements pour les sportifs d'endurance. Le plus important est d'avoir une alimentation normoglucidique, voire hyperglucidique à base d'aliments à index glycémique bas. En effet, une consommation insuffisante en glucides ne permet pas d'avoir un stock complet en glycogène et diminue les performances même pour des efforts de durée courte. Leur consommation, juste avant l'effort et pendant toute la durée de celui-ci, est indispensable pour que l'organisme soit le plus performant possible. Les glucides sont également très importants pour la récupération. En effet, juste après un effort physique, ceux à index glycémiques élevés sont les plus intéressants.

Les lipides ne doivent pas être négligés, mêmes s'ils ne changent rien au niveau de la performance, notamment pour garder un apport en acides gras essentiels suffisant. La supplémentation en oméga 3 pourrait avoir un effet bénéfique en diminuant l'inflammation provoquée par l'exercice.

Pour les protéines, leur co-ingestion avec des glucides en période de récupération permet d'activer la vitesse de synthèse des protéines et de réduire la protéolyse. Pendant l'exercice musculaire, seuls les acides aminés branchés (AAB) sont utilisés avec l'augmentation de l'intensité de l'exercice et la diminution des stocks de glycogène. Leur supplémentation n'a pas d'utilité démontrée pendant l'exercice physique mais a un intérêt dans les deux heures suivant l'effort pour la reconstruction des protéines lysées

Il ne faut pas oublier l'hydratation (2 L d'eau sont nécessaires en moyenne chaque jour pour une personne sédentaire). Cette quantité sera plus importante avec l'augmentation de la durée de l'effort et/ou de la température extérieure. On conseille au sportif de consommer une boisson isotonique par petites gorgées, toutes les dix minutes environ lors de l'effort.

Les compléments alimentaires sont souvent riches en vitamines, minéraux et oligoéléments. Mais ceux-ci ne remplaceront jamais une alimentation équilibrée.

Cependant, des produits sont disponibles en officine et sont intéressants (boisson pour l'hydratation et enrichie en glucides par exemple). Le pharmacien peut les conseiller après analyse du besoin réel du sportif et de l'absence de risques.

Il doit néanmoins rester vigilant car la recherche de l'amélioration des performances peut pousser certaines personnes à une surconsommation (avec des surdosages, toxicités...) ou à la dérive vers une conduite dopante avec l'utilisation de produits interdits.

Le conseil diététique du sportif d'endurance est donc très intéressant et peut apporter de la nouveauté dans une officine. La majorité des gens ne pensent pas trouver une gamme de compléments alimentaires pour les sportifs dans une pharmacie. Alors que cela montrerait l'étendue des compétences du pharmacien, les valoriseraient, tout en lui permettant de se développer économiquement sur un segment en devenir.

Bibliographie

- [1] <http://www.inserm.fr/thematiques/sante-publique/dossiers-d-information/activite-physique> (consulté le 24/09/2012)
- [2] <http://www.e-sante.fr/sport-endurance/guide/1805> (consulté le 21/09/2012)
- [3] Sherwood L. *Physiologie humaine 2e édition*. Editions De Boeck Université ; 2006. 629p.
- [4] Åstrand P-O, Rodahl K. *Précis de physiologie de l'exercice musculaire 3e édition*. Edition Masson ; 1994. 530p.
- [5] <http://coproweb.free.fr/pagphy/physioan/ch7s1.htm> (consulté le 08/09/2013)
- [6] <http://www.mediadico.com/dictionnaire/definition/anisotrope> (consulté le 08/09/2013)
- [7] <http://www.mediadico.com/dictionnaire/definition/isotrope> (consulté le 08/09/2013)
- [8] Widmaier E-P, Raff H, Strang K-T. *Physiologie Humaine – Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme 5e édition*. Editions Maloine ; 2009. 888p.
- [9] Åstrand P-O, Rodahl K. *Précis de physiologie de l'exercice musculaire 3e édition*. Edition Masson ; 1994. 530p.
- [10] Carip C, Louet F. *Physiologie : Bases physiologiques de la diététique*. Edition Lavoisier ; 2004. 410p.
- [11] Widmaier E-P, Raff H, Strang K-T. *Physiologie Humaine – Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme 5e édition*. Editions Maloine ; 2009. 888p.
- [12] Ganong W-F. *Physiologie médicale 2e édition*. Editions De Boeck ; 2005. 850p.
- [13] Poortmans J-R, Boisseau N. *Biochimie des activités physiques 2e édition*. Editions De Boeck ; 2003. 480p.
- [14] Ferré J, Leroux P. *Préparation aux diplômes d'éducateur sportif, Tome 1 : Bases anatomiques et physiologiques de l'exercice musculaire et méthodologie de l'entraînement*. Editions Amphora ; 2009. 544p.
- [15] <http://essonne.franceolympique.com/essonne/fichiers/File/physiologieeffort.pdf> (consulté le 08/09/2013)
- [16] http://www.ulb.ac.be/sciences/intra/inforsc_archives/nrj/carpentier.htm (consulté le 08/09/13)
- [17] Widmaier E-P, Raff H, Strang K-T. *Physiologie Humaine – Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme 5e édition*. Editions Maloine ; 2009. 888p.
- [18] <http://www.medecine-et-sante.com/anatomie/coeur.html> (consulté le 09/09/2013)
- [19] http://www.alessandroconti.ch/coursbio/Biologiehumaine/fr/html/Quoiconstit_Organe.html (consulté le 09/09/13)

- [20] <http://www.larousse.fr/encyclopedie/nom-commun-nom/circulation/34108> (consulté le 20/09/2013)
- [21] Widmaier E-P, Raff H, Strang K-T. *Physiologie Humaine – Les mécanismes du fonctionnement de l'organisme 5e édition*. Editions Maloine ; 2009. 888p.
- [22] Billat V. *Physiologie et méthodologie de l'entraînement de la théorie à la pratique 2e édition*. Editions De Boeck ; 2003. 224p.
- [23] <http://www.conseils-courseapied.com/physiologie/frequence-cardiaque-entrainement-course-a-pied.html> (consulté le 09/09/2013)
- [24] <http://campusport.univ-lille2.fr/physio/res/resspdf.pdf> (consulté le 09/09/2013)
- [25] <http://www.santepratique.fr/fonctionnement-poumons.php> (consulté le 09/09/2013)
- [26] <http://www.coursmedecine.com/physiologie/cours-physiologie/lappareil-respiratoire-les-organes-des-voies-respiratoires-superieures/> (consulté le 09/09/2013)
- [27] Sherwood L. *Physiologie humaine 2e édition*. Editions De Boeck Université ; 2006. 629p.
- [28] Carip C. *Biologie appliquée à la santé*. Editions Lavoisier ; 2002. 562p.
- [29] Billat V. *Physiologie et méthodologie de l'entraînement de la théorie à la pratique 2e édition*. Editions De Boeck ; 2003. 224p.
- [30] Poortmans J-R, Boisseau N. *Biochimie des activités physiques*. Editions De Boeck ; 2002. 480p.
- [31] Billat V. *Physiologie et méthodologie de l'entraînement de la théorie à la pratique 2e édition*. Editions De Boeck ; 2003. 224p.
- [32] http://www.chusa.jussieu.fr/pedagogie/pcem2/physio/P2_Physio_respir_hematose.pdf (consulté le 11/09/2013)
- [33] McArdle W, Katch F, Katch V. *Physiologie de l'activité physique – Energie, nutrition et performance 4e édition*. Editions Maloine/Edisem ; 2001 712p.
- [34] <http://campusport.univ-lille2.fr/physio/res/resspdf.pdf> (consulté le 11/09/2013)
- [35] http://www.cesap.asso.fr/3_formation_documentation_ressources/Docs%20PDF/Ress/Aspects_%20medicaux_alimentation_personnes_polyhandicapees_%20Th_Rofidal_c hap2_physiologie.pdf [Dr Thierry Rofidal, 2004] (consulté le 16/09/2013)
- [36] <http://www.doctissimo.fr/html/sante/atlas/fiches-corps-humain/systeme-digestif-02.htm> (consulté le 16/09/2013)
- [37] http://www.cesap.asso.fr/3_formation_documentation_ressources/Docs%20PDF/Ress/Aspects_%20medicaux_alimentation_personnes_polyhandicapees_%20Th_Rofidal_c hap2_physiologie.pdf [Dr Thierry Rofidal, 2004] (consulté le 16/09/2013)

- [38] Castaing D, Borie D, Bismuth H. Anatomie du foie et des voies biliaires. *EMC – Techniques chirurgicales – Appareil digestif* ; 1997 : 1-0 [Article 40-760].
- [39] http://www.saes-surgery.ch/pb/vesicule_biliaire.html (consulté le 16/09/2013)
- [40] Dufresne M. Physiologie du pancréas exocrine. *EMC – Hépatologie* ; 2012 ; 7(3) : 1-9.
- [41] <http://www.fmed.ulaval.ca/med-18654/prive/Cours%2006%20et%2007/Pdf/Physiologie%20digestive.PDF> (consulté le 16/09/2013)
- [42] <http://didel.script.univ-paris-diderot.fr/claroline/backends/download.php?url=L0NFU19CQi9E6WdsdXRpdGlvbi5wZGY%3D&cidReset=true&cidReq=YB> (consulté le 25/10/2012)
- [43] <http://www.lanutrition.fr/bien-comprendre/biologie-de-la-nutrition/la-digestion/la-digestion.html> (consulté le 16/09/2013)
- [44] Guénard H. *Physiologie humaine 3e édition*. Editions Pradel ; 2001. 606p.
- [45] Sherwood L. *Physiologie humaine 2e édition*. Editions De Boeck ; 2006. 629p.
- [46] <http://bio.m2osw.com/gcartable/pancreas.htm> (consulté le 16/09/2013)
- [47] http://www.ysonut.fr/pdf/enseignements/Digestion_et_absorption_nutriments.pdf (consulté le 16/09/2013)
- [48] Brooker C-G. *Le corps humain – Etude, structure et fonction, Le rôle infirmier dans la pratique clinique 2e édition*. Editions De Boeck ; 2001. 562p.
- [49] <http://www.e-sante.fr/digestion-en-video/video/503> (consulté le 16/09/2013)
- [50] Ritz P, Couet C. *La dépense énergétique. Cahiers de Nutrition et de Diététique*. Septembre 2005 ; 40(4) : 227-232.
- [51] Potier de Courcy G, Frelut ML, Fricker J, Martin A et Dupin H. Besoins nutritionnels et apports conseillés pour la satisfaction de ces besoins. *EMC - Endocrinologie-Nutrition* ; 2003 ; 10-308-A-10 : 32 p.
- [52] McArdle W-D, Katch F-I, Katch V-L. *Nutrition et performances sportives*. Editions De Boeck ; 2004. 686p.
- [53] http://umvf.univ-nantes.fr/nutrition/enseignement/nutrition_5/site/html/cours.pdf (consulté le 16/09/2013)
- [54] http://www.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/gbourbonnais/pascal/fya/chimcell/notesmolecules/glucides_1.htm (consulté le 16/09/2013)
- [55] http://www.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/gbourbonnais/pascal/fya/chimcell/notesmolecules/glucides_2.htm (consulté le 16/09/2013)

- [56] <http://ead.univ-angers.fr/~jaspard/Page2/COURS/Zsuite/1Respiration/6Mobilisation/1Mobilisation.htm> (consulté le 16/09/2013)
- [57] http://www.cegep-ste-foy.qc.ca/profs/gbourbonnais/pascal/fya/chimcell/notesmolecules/glucides_3.htm (consulté le 16/09/2013)
- [58] <http://dechetsorganiques.free.fr/cellulose.htm> (consulté le 16/09/13)
- [59] Chevallier L. *Nutrition principes et conseils 3e édition*. Editions Masson ; 2009. 254p.
- [60] <http://www.anses.fr/PN8701.htm> (consulté le 14/11/2012)
- [61] <http://www.e-sante.fr/glucides-besoins-quotidiens/guide/848> (consulté le 16/09/2013)
- [62] <http://www.lesucre.com/faq/edulcorants> (consulté le 16/09/2013)
- [63] Chevallier L. *Nutrition principes et conseils 3e édition*. Editions Masson ; 2009. 254p.
- [64] Pigeyre M, Romon M. L'index glycémique est-il utilisable en pratique ? . *Cahiers de nutrition et de diététique*. Septembre 2006 ; 41(4) : 247-251.
- [65] Jacotot B, Campillo B. *Nutrition humaine*. Editions Masson ; 2003. 311p.
- [66] http://www-lemm.univ-lille1.fr/biologie/biochim/co/ch3_04_1_1.html (consulté le 16/09/2013)
- [67] <http://sante.lefigaro.fr/mieux-etre/nutrition-nutriments/lipides/differents-lipides> (consulté le 16/09/2013)
- [68] Sebedio J-L. Acides gras trans : nature origine et impact sur la santé. *Cahiers de nutrition et de diététique*. Novembre 2007 ; 45(5) : 239-246.
- [69] <http://www.eurekasante.fr/nutrition/corps-aliments/lipides-energie.html?pb=acides-gras-satures-insatures-trans> (consulté le 18/09/2013)
- [70] <http://sante.lefigaro.fr/mieux-etre/nutrition-nutriments/lipides/differents-lipides> (consulté le 18/09/2013)
- [71] Chevallier L. *Nutrition principes et conseils 3e édition*. Editions Masson ; 2009. 254p.
- [72] Baudat N. *Petit précis de nutrition*. Editions Lamarre ; 2008. 312p.
- [73] Belleville J. Le goût pour les lipides. *Cahiers de nutrition et de diététique*. Décembre 1998 ; 3(6) : 365.
- [74] <http://www.eufic.org/article/fr/page/BARCHIVE/expid/PRINCIPES-DE-BASE-LES-PROTEINES/> (consulté le 18/09/2013)
- [75] http://www.uvp5.univ-paris5.fr/wikinu/docvideos/Grenoble_1011/seve_michel/seve_michel_P11/seve_michel_P11.pdf (consulté le 18/09/2013)

- [76] <http://www.nutrixlab.com/dossier-proteine-construction-musculaire.php> (consulté le 11/11/2012)
- [77] <http://www.i-dietetique.com/?action=articles&id=6009> (consulté le 18/09/2013)
D'après le rapport de l'AFSSA : « Apport en protéines : consommation, qualité, besoins et recommandations, 2007 ».
- [78] http://www.lediet.fr/site_clinique_article_lediet.html?cas1=dossiers_contenu&cas2=35&cas3=2&cas4=dossiers_categories&cas5=15 (consulté le 18/09/2013)
- [79] <http://www.nutriting.com/comprendre-la-nutrition/la-nutrition-en-7-lecons/les-proteines/> (consulté le 18/09/13)
- [80] Apfelbaum M, Romon M, Dubus M. *Diététique et nutrition 7e édition*. Editions Masson ; 2009 : 516p.
- [81] <http://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/168/?sequence=15> (consulté le 18/09/2013)
- [82] Rullier B. *L'hygiène alimentaire*. Editions Nathan ; 2007. 160p.
- [83] <http://www.anses.fr/PN7801.htm> (consulté le 07/11/2012)
- [84] <http://www.anses.fr/PNR901.htm> (consulté le 07/11/2012)
- [85] <http://www.anses.fr/PN2B01.htm> (consulté le 07/11/2012)
- [86] Berthélémy S. Les oligoéléments, généralités et macroéléments. *Actualités Pharmaceutiques*. Mars 2008 ; 47(472) : 24-29.
- [87] A.-M. Roussel, I. Hininger-Favier. Éléments-trace essentiels en nutrition humaine : chrome, sélénium, zinc et fer. *EMC - Endocrinologie-Nutrition* ; 2009 : 1-16 [Article 10-359-B-10].
- [88] <http://sante-medecine.commentcamarche.net/faq/436-aliments-riches-en-fer> (consulté le 20/10/2013)
- [89] <http://www.clinique-du-dos.com/travaux/equilibre-alimentaire.php> (consulté le 20/10/2013)
- [90] <http://www.guide-vitamines.org/oligoelements/iode> (consulté le 20/10/2013)
- [91] <http://www.guide-vitamines.org/oligoelements/iode/roles-iode.html> (consulté le 20/10/2013)
- [92] <http://www.guide-vitamines.org/oligoelements/iode/besoins-quotidiens-iode-exces.html> (consulté le 20/10/2013)
- [93] <http://www.guide-vitamines.org/oligoelements/iode/sources-alimentaires-iode.html> (consulté le 20/10/2013)

- [94] http://www.eurocopper.org/doc/uploaded/File/Fact_sheets_health_FR.pdf (consulté le 19/11/2012)
- [95] <http://www.notretemps.com/sante/fluor-email-tissus-osseux,i8545> (consulté le 20/10/2013)
- [96] Berthélémy S. Les oligoéléments, généralités et macroéléments. *Actualités Pharmaceutiques*. Mars 2008 ; 47(472) : 24-29.
- [97] Jéquier E, Constant F. Pourquoi faut-il boire de l'eau ? Pour maintenir la balance hydrique. *Cahiers de nutrition et de diététique*. Septembre 2009 ; 44 (4) : 190-197.
- [98] McArdle W-D, Katch F-I, Katch V-L. *Nutrition et performances sportives*. Editions De Boeck ; 2004. 686p.
- [99] Association des enseignants de nutrition en faculté de pharmacie. *Principes de nutrition pour le pharmacien*. Editions Lavoisier ; 2005. 475p.
- [100] <http://www.sge-ssn.ch/fr/toi-et-moi/boire-et-manger/equilibre-alimentaire/pyramide-alimentaire/> (consulté le 13/11/2013)
- [101] Gomez-Merino D, Portero P. Nutrition glucidique et exercice physique□: aspects pratiques. *Kinésithérapie, la Revue*. Octobre 2006 ; 6(58) : 38-43.
- [102] Gomez-Merino D, Portero P. Nutrition lipidique, santé et sport. *Kinésithérapie, la Revue*. Janvier 2008 ; 8(73) : 57-62.
- [103] Gomez-Merino D, Portero P. Besoins en protéines et activités physiques : Aspects pratiques. *Kinésithérapie, la Revue*. Mai 2007 ; 7(65) : 40-44.
- [104] Riché D. Diététique et micronutrition des sports d'endurance. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*. Avril 2005 ; 40(2) : 115-20.
- [105] www.eafit.com (consulté le 13/01/2014)
- [106] <http://www.stc-nutrition.fr/fr/nutrition-sportive/energie> (consulté le 13/01/2014)
- [107] Pillon F, Screve C. Alimentation du sportif et conduite dopante. *Actualités Pharmaceutiques*. Mars 2011 ; 50(504) : 15-18.
- [108] Fouillot J-P. Dopage et compléments alimentaires. *Science & Sports*. Août 2005 ; 20(4) : 181-183.
- [109] Labarde S, Bugeaud J-L, Nouaille Yves. Quelques généralités sur le dopage. *Actualités Pharmaceutiques*. Février 2013 ; 52(523) : 16-17.
- [110] <http://www.wada-ama.org/fr/Education-Sensibilisation/Outils-educatifs/Brochure-sur-les-dangers-du-dopage/> (consulté le 14/01/2014)
- [111] Laure P. Epidémiologie du dopage. *Immuno-analyse & Biologie Spécialisée*. Avril 2001 ; 16(2) : 96-100.

- [112] Guezennec Ch-Y. Le dopage : efficacité, conséquences, prévention. *Annales d'endocrinologie*. Mars 2001 ; 62(1) : 33-41.
- [113] Laure P. Le dopage: données épidémiologiques. *La Presse Médicale*. Juillet 2000 ; 29(24) : 1365-1372.
- [114] Hultman E-H, Nilsson L-H. Liver glycogen in man : Muscle metabolism during exercise. In : B. Pernow and B. Saltin Eds, *New York Plenum Press*. 1977 ; 143-151.
- [115] Galbo H, Holst J, Christensen N-J. The effect of different diets on insuline and hormonal response to prolonged exercise. *Acta Physiol Scand*. 1967 ; 107 : 19-32.
- [116] Burke L-M, Hawley J-A, Schabort E-J, St Clair Gibson A, Mujika I, Noakes T. Carbohydrate loading failed to improve 100 km cycling performance in a placebo controlled trial. *J Appl Physiol*. 2000 ; 88 : 1284-1290.
- [117] Koivisto V, Karonen S-L, Nikkila E-A. Carbohydrate ingestion before exercise: comparison of glucose, fructose and sweet placebo. *J Appl Physiol*. 1981 ; 51 : 783-787.
- [118] Coyle E-F, Hagberg J-M, Hurley W-H, Martin A, Eshani A, Holloszy H. Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J Appl Physiol*. 1983 ; 55 : 230-235.
- [119] Febbraio M, Chiu A, Angus D, Arkinstall M-J, Hawley J-A. Effects of carbohydrate ingestion before and during exercise on glucose kinetics and performance. *J Appl Physiol*. 2000 ; 89 : 2220-2226.
- [120] Chos D, Riche D. Safety fat intake among athletes with a high level of training. *Science et sports*. 2005 ; 20 : 74-82.
- [121] Blomstrand E, Hassmen P, Ekblom B, Newsholme E-A. Administration of branched-chain amino acids during sustained exercise : effect on performance and on plasma concentration of some amino acids. *Eur J Appl Physiol*. 1991 ; 63 : 83-88.
- [122] <http://www.sante.gouv.fr/questions-reponses-sur-les-complements-alimentaires.html> (consulté le 16/02/2014)
- [123] Crowe M-J, Weatherson J-N, Bowden BF. Effects of dietary leucine supplementation on exercise performance. *Eur J Appl Physiol*. 2006 ; 97 : 664-672.
- [124] Blomstrand E, Hassmen P, Ekblom B, Newsholme EA. Effect of branchedchain amino acid supplementation on mental performance. *Acta Physiol Scand*. 1991 ; 143 : 225-226.
- [125] Ministère des affaires étrangères. *Décret n° 2013-1286 du 27 décembre 2013 portant publication de l'amendement à l'annexe de la convention contre le dopage, adopté à Strasbourg le 14 novembre 2013, et à l'annexe I de la convention internationale contre le dopage dans le sport, adopté à Paris le 11 novembre 2013*. Journal Officiel de la République Française ; Texte 2 sur 148.



DECISION D'AUTORISATION DE SOUTENANCE

Nom et Prénom de l'étudiant : OTT THIBAUT

Date, heure et lieu de soutenance :

Le 14 05 2014 à 18 h 15 Amphithéâtre ou salle :

Avis du conseiller de thèse:

Nom : KAMBA

Prénom : N. SOAS

☒ favorable

☐ défavorable

Motif de l'avis défavorable :

Date : 26/02/14

Signature: 

Avis du Président de Jury

Nom : DINE

Prénom : THIBAUT

☒ favorable

☐ défavorable

Motif de l'avis défavorable :

Date : 26/02/14

Signature: 

Décision de Monsieur le Doyen:

☒ favorable

☐ défavorable



Le 

L. DUBREUIL

NB : La faculté n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans ces thèses, qui doivent être regardées comme propres à leurs auteurs.

Université de Lille 2
FACULTE DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES ET BIOLOGIQUES DE LILLE
DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE
Année Universitaire 2013/2014

Nom : OTT
Prénom : Thibault

Titre de la thèse : Rôle du pharmacien d'officine dans le conseil diététique du sportif d'endurance.

Mots-clés : sport, sportif, endurance, muscles, aérobie, nutrition, diététique, métabolisme, glucides, lipides, protéines, aliments, conseil, dopage, officine.

Résumé :

Les sports d'endurance nécessitent une grande préparation physique, mais la diététique est souvent négligée alors qu'elle est un des points essentiels de la performance.

Le pharmacien d'officine doit donc connaître la physiologie du sportif, ses différents besoins énergétiques ainsi que la diététique adaptée.

Par sa polyvalence, il doit donc pouvoir s'adapter à chaque personnalité, à chaque demande, à chaque besoin. Le pharmacien conseillera alors efficacement des compléments alimentaires, tout en évitant la dérive vers des conduites dopantes.

Membres du jury :

Président : Monsieur DINE Thierry,
Professeur de pharmacie clinique, Faculté de Pharmacie, Université Lille 2.
Praticien hospitalier, Centre Hospitalier d'Haubourdin.

Assesseur : Monsieur KAMBIA Nicolas,
Maître de conférences en pharmacologie, Faculté de Pharmacie, Université Lille 2.

Membre extérieur : Monsieur KACZMAREK Thibaut,
Docteur en pharmacie, Laboratoire du Centre Oscar Lambret, Lille.