



HAL
open science

L'adaptation physiologique et nutritionnelle du coureur du grand raid, ultra-trail à l'Île de la Réunion

Olivia Gautier

► **To cite this version:**

Olivia Gautier. L'adaptation physiologique et nutritionnelle du coureur du grand raid, ultra-trail à l'Île de la Réunion. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02328926

HAL Id: dumas-02328926

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02328926>

Submitted on 23 Oct 2019

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

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

L'adaptation physiologique et nutritionnelle du coureur du grand raid, ultra-trail à l'île de la Réunion

Olivia Gautier

► **To cite this version:**

Olivia Gautier. L'adaptation physiologique et nutritionnelle du coureur du grand raid, ultra-trail à l'île de la Réunion. Sciences du Vivant [q-bio]. 2019. dumas-02328926

HAL Id: dumas-02328926

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02328926>

Submitted on 23 Oct 2019

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

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

Thèse pour l'obtention du :

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

Présentée et soutenue publiquement par

Olivia GAUTIER

Née le 14 Janvier 1993 à Saint Paul, à l'Ile de la Réunion

Le jeudi 27 juin 2019 à Bordeaux

**L'ADAPTATION PHYSIOLOGIQUE ET
NUTRITIONNELLE DU COUREUR DU GRAND
RAID, ULTRA-TRAIL A L'ILE DE LA REUNION.**

Directeur de thèse
Monsieur Jean-François QUIGNARD

Membres du jury :

Directeur de thèse et président du jury : Monsieur Jean-François QUIGNARD

Membres du jury extérieur : Elodie LECLER et Gérard CARRARA

Table des matières

I. Liste des abréviations	8
II. Liste des figures.....	10
III. Liste des tableaux.....	12
IV. Introduction générale	13
A. La Réunion, une aire de jeu idéale pour l'ultra-Trail.....	13
B. L'ultra-Trail, une discipline au-delà du raisonnable ?.....	16
C. Le Grand Raid fête ses 30 ans cette année	18
V. L'adaptation physiologique du sportif de l'extrême.....	23
A. Les différentes sources d'énergie à l'exercice	24
1. La voie de la créatine phosphate (CP).....	24
2. La voie de la glycolyse anaérobie ou voie anaérobie lactique	24
3. La voie de la phosphorylation oxydative ou voie aérobie	25
4. Les substrats à l'effort.....	29
B. Rappels physiologiques	31
1. Maillon pulmonaire	31
2. Maillon cardiovasculaire.....	37
3. Maillon musculaire	42
C. Réponses physiologiques aux conditions extrêmes.....	46
1. Maillon pulmonaire	46
2. Maillon cardiovasculaire.....	50
3. Maillon musculaire	52
VI. L'adaptation nutritionnelle du sportif de l'extrême	53
A. L'équilibre alimentaire	53
B. Orientation dans le choix des nutriments	54
1. Les glucides.....	54
2. Les lipides.....	60
3. Les protides	64
C. Orientation micronutritionnelle.....	67
1. Les vitamines	73
2. Les antioxydants.....	75
3. Les Acides Gras essentiels : oméga-3 et oméga-6.....	77
4. Les minéraux.....	81
5. Les probiotiques et prébiotiques	85
D. L'hydratation	86
1. Composition.....	86
2. Rôles et fonctions de l'eau dans notre organisme.....	87
3. La régulation de l'eau	87
4. Les besoins en eau	88
5. Conséquences de la déshydratation.....	89
6. Le Coca-Cola	89
7. Les boissons « de l'effort ».....	90
8. L'hyponatrémie induite par l'exercice	91
VII. L'alimentation autour de la pratique sportive	92
A. Pendant l'entraînement et repas pré-compétitif	94
B. Pendant l'activité sportive	96

C.	La récupération.....	97
VIII.	<i>Cas de comptoir d'un trailer.....</i>	98
A.	Troubles digestifs.....	98
B.	Dopage volontaire ou involontaire	100
IX.	<i>Conclusion.....</i>	102
X.	<i>Bibliographie :</i>	103

Remerciements :

A mon maitre de thèse, Monsieur Jean-François QUIGNARD,

Je vous remercie de l'intérêt et du temps que vous m'avez accordé en acceptant de diriger cette thèse. Merci pour votre patience, votre disponibilité et votre réactivité. J'espère que mon travail vous satisfera.

A mon parrain Gégé,

Merci de m'honorer de ta présence dans mon jury pour ce jour important comme tu l'as fait il y a 30 ans pour papa. Tu m'as soutenue toutes mes années d'étude et j'espère que tu seras fier de moi aujourd'hui en me voyant prêter serment.

A ma nouvelle et très chère amie Elodie,

Merci de m'honorer de ta présence dans mon jury, tu as fait le déplacement de si loin (presque) que pour ça et j'en suis RAVIE !!! Notre vraie rencontre qui a signé le début d'une grande amitié est récente mais a été très intense. Deux semaines de dingue aux Bahamas pour un congrès pharmaceutique intense (haha) et à Cuba lors desquelles on a enchainé les pina colada, les soirées, les sessions bronzage, les balades, les sessions beach tennis et les moments de confidences. Je sais que tu en as déjà une vraie, mais on peut dire que je suis ta « sœur jumelle de cœur ».

A mes parents adorés,

Je ne peux pas vraiment vous remercier pour votre aide à la rédaction de ma thèse... En tout cas pas comme Yolaine a aidé Tatan !! hahaha Mais en tout cas merci pour cette vie de rêve que vous nous offrez au quotidien. Merci pour tout l'amour que vous nous portez et merci pour cette éducation qui ont fait de nous les femmes qu'on est aujourd'hui avec Jade. Notre complicité est inégalable et fait de nous cette famille si soudée et si heureuse dont je suis fière.

Vous avez toujours tout fait pour nous et nous avez fait passer en priorité à chaque moment de votre vie. Même si de temps en temps vous avez l'impression que je n'en ai pas conscience, soyez en sûr que oui, et je vous en suis vraiment reconnaissante.

Votre passion pour votre métier m'a complètement gagnée et je n'ai jamais pensé en faire un autre. Aujourd'hui je peux vous assurer que je suis une pharmacienne... (et bientôt docteur) totalement comblée.

MERCI POUR TOUT, JE VOUS AIME PLUS QUE TOUT !!!

A ma sœur chérie,

Tellement de choses à dire que je pourrais en écrire une thèse entière ! Mon Jadou, que serais-je sans toi ? Tu es ma moitié, la personne la plus importante dans ma vie. Malgré notre différence d'âge assez importante, on s'est toujours très bien entendues et avons développé une relation particulièrement complice. Tout ce que nous avons vécu ensemble autant dans notre quotidien à la maison que durant les vacances, nous a créé

des souvenirs mémorables... plusieurs me viennent à l'esprit et me donnent envie de rire, je pourrais en citer des centaines.

Les années passent trop vite et je te vois encore comme mon petit bébé... que tu n'es plus, bien évidemment. Tu es une jeune femme parfaite de qui je suis très fière.

A notre future dynastie et à toutes nos aventures à venir, LOVE YOU MON BABY.

Ps : Paulo t'as intérêt à bien t'occuper d'elle quand je serais partie à Tahiti ! haha

A ma famille maternelle,

Je vous remercie d'avoir toujours été là pour moi. Tous ces étés passés dans notre fameux Castelli m'ont vraiment marquée, et j'espère qu'on y passera encore plein de bons moments en famille. Entre les parties de barbie avec Caro, les batailles d'eau avec Arnaud, les soirées Koh Lanta/île de la tentation avec Sof, les repas interminables chez les Avril concoctés par Pat, les parties de pétanque endiablées, les soirées déguisées chez les Proudhon, les séjours à St Trop...

Je remercie la famille Remignon de m'avoir accueillie plus d'une fois à la dernière minute quand j'avais besoin de réconfort et de câlins durant mes études à Bordeaux.

Petite pensée pour notre très chère mamie Simone qui nous a quittés récemment, je sais que tu aurais été plus que fière de nous savoir pharmaciennes avec Jade.

A ma famille paternelle,

Je vous remercie également d'avoir toujours été là pour moi, je me rappellerai toujours la soirée de mes 18 ans passée chez vous pendant mon année de PACES alors que j'étais abandonnée par mes parents, haha.

Entre les weekends à la maison à jouer aux « enfants perdus » avec Julia et Piere, les vacances à Nans ou Saint Vaast, les Noël en famille... que de bons moments et encore plein d'autres à venir.

Petite pensée pour notre papi Robert qui nous a quittés il y a maintenant dix ans, sache qu'on s'occupe bien de mamie.

Aux La Rosa, ma deuxième famille,

Je vous remercie d'avoir toujours été là pour moi, tous les moments et surtout les voyages que nous avons faits ensemble font que nos deux familles ont une relation spéciale, familiale. Merci Fredou de m'avoir accueilli en tant que stagiaire puis remplaçante dans ton empire, j'ai appris beaucoup et je t'en suis vraiment reconnaissante.

Andréa, ma « second sister », tellement de choses à dire aussi, je pourrais carrément écrire une série avec plusieurs saisons. Tous ces voyages en famille organisés par les parents, puis ceux qu'on s'organise maintenant nous même. J'espère que ça continuera encore bien longtemps et qu'on explorera le monde entier accompagnées de notre petite tribu (dans un futur pas si proche ne t'inquiète pas !! haha).

LOVE YOU BABY

A ma coloc Johana,

7 ans de vie commune, ma plus longue relation ! ahah A toutes nos périodes de révisions communes, chacune dans sa chambre à s'envoyer des textos et à se retrouver pour déjeuner devant « les anges », à tous nos craquage « goûters » au lieu d'aller à la salle de sport, à toutes ces retrouvailles débrief de lendemain de soirée ou de fin de vacances, à tous ces repas organisé dans notre « chez nous »...

Un chapitre se tourne pour nous deux dans les mois à venir avec un changement de ville et de vie mais j'espère que nos chemins se recroiseront très vite pour encore de belles aventures.

A mon amie Léa Boukiki, avec qui j'ai partagé toutes les étapes de ma vie depuis la 6ème... Collège, lycée, PACES, études à Bordeaux et bientôt une nouvelle aventure à l'autre bout du monde ensemble. Merci d'avoir toujours été là pour moi et surtout de m'avoir plus que motivée pendant cette dernière année pour la rédaction de ma thèse ! Notre voyage d'un mois en Asie reste gravé dans ma mémoire comme un des meilleurs, merci de m'avoir associée à ce trip avec tes amies.

A Julian mon BFF,

Que dire ? Quel plaisiiiiir d'avoir un ami comme toi !! Grace à toi mon intégration à Bordeaux a été facilitée et ma vie changée ! Une rencontre rapide il y a maintenant 8 ans et depuis nous ne nous sommes pas lâchés. Je pourrais te remercier pour ma thèse de m'avoir conviée à cet après-midi à la BU où on a « essayé » de bosser, mais je te remercie surtout d'être l'ami que tu es pour moi au quotidien. J'espère que tu feras partie de ma vie encore longtemps !!!

A tous mes amis de la Réunion avec qui j'ai passé des moments fabuleux sur notre île magique. Entre les aprem piscines anniversaires puis les soirées au zaza, les feux de camp, les après-midis entières à la plage d'étang salé, les samedis au golf à fumer des clopes, les parties de beach tennis... J'espère que notre futur sera rempli d'encore plein de bons moments là-bas.

Une spéciale dédicace au R.B Crew, toutes ces années collège/lycée sont inoubliables grâce à vous !!!!! Et j'espère que dans 15 ans on sera toujours pareil et que nos enfants prendront notre belle relève ensembles !! hahaha Stan, Léa, Tibo, Ugo, Eme, Alain, Chloé, Romain, Clément, Sambo, Fifi.

Pensée spéciale pour mon amie de toujours Rosa avec qui on a fait les 400 coups... for ever and ever.

Et tous les autres avec qui j'ai passé des moments extra pendant notre folle jeunesse : Lodey, Mayiin, Tintin, Eva, Fany, Gabi, Khan Ting, Eva, Fabien, Jordan, Brice, Calto, Tatan, Agathe, Laure, Manon et tous les autres bien sûre.....

Malgré la distance et le peu de fois où l'on se voit, notre amitié reste intacte et c'est ce qui prouve qu'elle est réelle.

A tous mes amis rencontrés pendant mes études à Bordeaux,

Vous êtes devenus une seconde famille. Tous ces moments de vie partagés au quotidien durant ces huit années de vie pseudo-étudiante font que notre relation est spéciale.

Tous ces goûters manucure commérages avec Jo, Margaux, Crockett, Clem, Marion, Coff Coff. Vous êtes plus que des amies, les best. A notre prochain trip ensemble ! EVJF margaux ?... ;)

Tous ces apéros et soirées avec toute la team, Ju, Crockett x2, Jo, Anais, Toff, Margaux, Vinz, Clem, Batou, Clem fée clochette, Raf, Florianne, Bouki, Charline, Stelou, Laure, Pen, Sésé... et tous les autres bien sûr !

Tous ces repas et brunch organisés.

Tous ces lendemains de soirées débrief.

Tous ces « café » à l'intendance.

Toutes ces tentatives de course autour des deux ponts avec Léa, Andréa, Jo et Jadou.

Bref... Que des moments mémorables,

Vous êtes rentrés dans ma vie et j'espère que vous n'en sortirez pas de sitôt.

A mes copines de pharma,

Merci pour toutes ces fiches que vous m'avez envoyées pendant les périodes de révisions quand j'étais complètement dans le rush... haha

Je repense à ces petits goûters gossip girl qu'on se faisait chez Aurélie avec Charline, Sophie, Lucie et même quelques fois Samy.

Merci à Tiff et Faufau d'avoir fait du stage à Libourne une super aventure. Je suis ravie de vous avoir rencontrées. Et Tiff, à notre nouvelle aventure commune dans le Pacifique !!!

A mon petit Zoreil,

Merci au destin pour cette rencontre à Chambord avec ce bel inconnu aux bottes jaunes. Et merci à toi de m'avoir stalkée et harcelée pour provoquer notre deuxième rencontre... ;)

Tous les moments passés ensemble sont totalement « hors du temps » haha

A toute l'équipe de la pharmacie Saint Louisienne et la Zac Bank,

Merci pour votre accueil lors de mon stage et de mes remplacements, j'ai appris énormément auprès de vous et je vous en suis très reconnaissante. Il n'y a rien de mieux que l'apprentissage sur le terrain !

A toutes ces personnes qui ont pris de leur temps personnel pour répondre à mes questions lors de la rédaction de ma thèse.

Je remercie Claude Marodon, David Cerveaux, Romain basset, Sylvain, Bérengère, Sophie, Laetitia, Gaelle...

I. Liste des abréviations

ATP : Adénosine Triphosphate
ADP : Adénosine Diphosphate
Pi : Phosphate inorganique
CP : Créatine Phosphate
AMP : Adénosine Monophosphate
NAD : Nicotinamide adénine dinucléotide
O₂ : Dioxygène
FAD : Flavine Adénine Dinucléotide
AGL : Acides Gras Libres
CPTI : Carnitine Palmitoyl Transférase I
RLO : Radicaux Libres Oxygénés
CO₂ : Dioxyde de carbone
PA : Pression alvéolaire
Patm : Pression atmosphérique
VE : Ventilation globale
Fr : Fréquence respiratoire
VT : Volume courant ou Tidal
SV1/ SV2 : Seuil ventilatoire ½
HCO₃⁻ : ions bicarbonates
PaO₂ : Pression partielle artérielle
SaO₂ : Saturation artérielle de l'hémoglobine en O₂
2,3 DPG : Di phospho Glycérate
VEMS : Volume Expiratoire Maximal par Seconde
CVF : Capacité Vitale Forcée
VRI/VRE : Volume de réserve inspiratoire/ expiratoire
CV : Capacité Vitale
EPO : Erithropoïétine
PAS /PAD : Pression Artérielle Systolique/ Diastolique
Qc : Débit cardiaque
R : Résistances à l'écoulement
VTD : Volume télédiastolique
VES : Volume d'éjection systolique
VTS : Volume télésystolique
Fc : Fréquence cardiaque
IC : index cardiaque
VA : Ventilation Alvéolaire
HIE : Hypoxémie Induite à l'Exercice
ARNm : Acide Ribonucléique messenger
SDH : Succinate Déshydrogénase
IG : Index Glycémique
DE : Dextrose Equivalent

MTC : Medium chain triglycérides
BCAA : Branched chain amino acids
IEDM : Institut Européen de Diététique et de Micronutrition
QA : Questionnaire Alimentaire
QVD : Questionnaire de vulnérabilité digestive
DNS : Questionnaire Dopamine Noradrénaline Sérotonine
DDM : Dépistage Déficience en micronutriment
SOD : Superoxydes dismutases
GPX : Glutathion peroxydase
DMLA : Dégénérescence maculaire liée à l'âge
GLA : Acide gamma linoléinique
DGLA : Acide Dihomo-gamma linoléinique
AA : Acide Arachidonique
EPA : Acide Eicosapentaénoïque
DHA : Acide docosahexaénoïque
OMS : Organisation mondiale de la santé
FAO : Food and agricultur organization
Pi : Poids initial
Pf : Poids final
V : Volume de liquide pris pendant une séance
GTP : Guanosine Triphosphate
AMPK : Adénosine Monophosphate kinase

II. Liste des figures

- Figure 1** : Chronologie de la course qui traverse l'île de la Réunion
- Figure 2** : Publicité pour la marche des cimes
- Figure 3** : publicité pour la grande traversée
- Figure 4** : Logo du Grand Raid
- Figure 5** : Tracée de la course avec dénivelé
- Figure 6** : La glycolyse
- Figure 7** : Le cycle de Krebs
- Figure 8** : La Beta-oxydation des acides gras
- Figure 9** : Schéma récapitulatif de la phosphorylation oxydative
- Figure 10** : La théorie du « Cross-over point »
- Figure 11** : Anatomie de l'appareil respiratoire
- Figure 12** : Les échanges gazeux
- Figure 13** : Détermination des seuils ventilatoires
- Figure 14** : Evolution de la lactémie en cours d'exercice
- Figure 15** : Courbe de dissociation de l'hémoglobine
- Figure 16** : Courbe de saturation de l'hémoglobine
- Figure 17** : Anatomie des lits capillaires
- Figure 18** : Le cycle cardiaque
- Figure 19** : Représentation de la loi de Starling
- Figure 20** : Anatomie d'un muscle strié squelettique
- Figure 21** : Détails d'une fibre musculaire
- Figure 22** : Schéma de la contraction musculaire
- Figure 23** : Courbe de Barcroft
- Figure 24** : Evolution de la PaO₂ en fonction de l'exercice
- Figure 25** : Pyramide alimentaire d'inspiration crétoise
- Figure 26** : Structure chimique du Glucose, du Galactose et du Fructose (monosaccharides)
- Figure 27** : Structure chimique du Lactose (disaccharide)
- Figure 28** : structure chimique de l'amidon
- Figure 29** : Détermination de l'index glycémique
- Figure 30** : Les rôles privilégiés du foie, du tissu adipeux et musculaire dans l'homéostat glycémique
- Figure 31** : Représentation simplifiée d'un triglycéride où R représente la molécule de chaque acide gras.
- Figure 32** : composition de la membrane cellulaire
- Figure 33** : Structure chimique d'un acide aminé
- Figure 34** : structure chimique des vingt acides aminés
- Figure 35** : Questionnaire Alimentaire
- Figure 36** : Questionnaire de vulnérabilité digestive
- Figure 37** : Questionnaire dopamine noradrénaline sérotonine
- Figure 38** : Dépistage de déficience micronutritionnelle

Figure 39: Structure chimique des oméga-3 et oméga-6

Figure 40 : La synthèse des acides gras polyinsaturés

Figure 41 : Les rôles métaboliques du magnésium

Figure 42: L'eau, élément indispensable à la vie

Figure 43 : Anatomie de la peau

Figure 44 : Comparaison de la tonicité des boissons à l'effort

Figure 45 : Adaptations circulatoires à l'effort

Figure 46 : Le dopage

III. Liste des tableaux

Tableau 1 : Evolution de la course du Grand Raid

Tableau 2 : Index glycémiques des aliments

Tableau 3 : Liste des acides aminés essentiels

Tableau 4 : Les vitamines hydrosolubles

Tableau 5 : Les vitamines liposolubles

IV. Introduction générale

A. La Réunion, une aire de jeu idéale pour l'ultra-Trail



L'île de la Réunion offre la diversité d'un continent sur seulement 2500 Km². A chaque étage de son relief, l'île change de visage. D'exubérante, elle se fait aride. De tropicale, elle devient alpestre. Elle joue à surprendre pour mieux séduire, à chaque détour de ses côtes ou de ses routes accrochées à la montagne. De plus, sous ces altitudes singulières, l'histoire a mitonné un cocktail exclusif de peuples et de cultures, dont les ingrédients viennent d'Afrique, d'Asie et d'Europe. Un métissage harmonieux à découvrir avec le cœur. Dans l'océan Indien, une petite terre française s'emploie à bousculer les clichés habituels des îles tropicales. Cette île, c'est la Réunion. Des cocotiers et des plages, il y en a, bien sûr. L'eau turquoise du lagon, l'ourlet blanc de la barrière de corail sont au rendez-vous des rêves exotiques.



Mais ils ne constituent qu'une petite partie de ce qu'offre l'île aux voyageurs en quête d'inédit, de rencontres, d'émotions et de sensations. Ici, la nature a laissé en héritage une extraordinaire richesse de paysages. Petite île presque ronde, une route nationale en fait le tour en 240 kilomètres, la Réunion est une montagne posée sur la mer, née de deux événements volcaniques majeurs. Le premier a fait émerger le magma à la surface de l'océan il y a environ deux millions et demi d'années, autour d'un cratère central dont les vestiges constituent aujourd'hui le point culminant de l'île : le Piton des Neiges (3 069 mètres). Le second s'est produit à une centaine de kilomètres au sud-est, il y a 380 000 ans. Un nouveau massif volcanique s'est formé et s'est accolé au premier, le Piton de la Fournaise (2 632 m). Celui-ci est toujours en activité : il entre régulièrement en éruption, donnant un spectacle d'autant plus féérique que l'on peut approcher sans risque fontaines et coulées de lave.



Au centre de l'île actuelle, de gigantesques effondrements ont formé trois cirques ouverts sur la mer par d'étroits défilés. Ils ont pour nom Mafate, Cilaos et Salazie. Parcours de sentiers de randonnées, de cascades et de gorges, ils constituent aujourd'hui des attraits majeurs pour les amoureux de la montagne.





Les plaines littorales sont étroites, les pentes s'élèvent rapidement. Côté mer, la barrière de corail émerge en discontinu sur une quinzaine de kilomètres, dans l'Ouest et dans le Sud. Au-delà de ces magnifiques plans d'eau turquoise bordés de sable blanc, comme devant les falaises de roches basaltiques, le récif frangeant cède rapidement la place aux grands fonds. Terre, air, eau ... ici, les loisirs sont partout en toute saison. Dans et sur l'océan, mais aussi sur terre et dans les airs, la Réunion est en " activité " toute l'année. Véritable parc de loisirs grandeur nature, l'île vous comblera : taquiner le marlin ou l'espadon lors d'une pêche au gros, caresser un poisson-lune ou perroquet à l'occasion d'une plongée, surfer sur les magnifiques vagues de l'océan indien, descendre les toboggans naturels des rivières en canyoning, découvrir la richesse des paysages lors de randonnées à pied, à cheval, en VTT, en 4x4 ou encore en les survolant en hélicoptère, parapente ou en delta. Même les plus difficiles trouveront leur bonheur et seront séduits par cette palette fantastique d'activité de plein air. Richesse des activités de loisirs mais richesse également culturelle. De par son histoire, la Réunion offre toutes les couleurs du monde, une population arc-en-ciel de 850 000 habitants. Sa diversité ethnique et culturelle est unique. Véritable terre d'élection d'une infinité de peuples, elle a accueilli depuis plus de trois siècles des populations issues de France, d'Afrique de l'Est, de Madagascar, des Comores, de Chine, d'Inde et du Pakistan. Choisir la Réunion, c'est s'évader pour un véritable dépaysement en toute sécurité. C'est en tout endroit, à toute heure, chacun à son rythme et à son goût, trouver un bonheur intense.



B. L'ultra-Trail, une discipline au-delà du raisonnable ?...

Petite anecdote de l'origine des ultra-trails :

« Si on devait nommer un pionnier dans l'histoire des ultra-trails, ce serait certainement Gordon Ainsleigh.

Le hasard de l'histoire a fait que cet amateur de cheval né en Californie en 1947, a initié les ultra-trails tels qu'on les connaît aujourd'hui.

En **1973** il dispute sa course préférée à cheval, la Western States de 100 milles (environ 160 kilomètres). Au bout de 29 milles il est obligé d'abandonner car son cheval est épuisé.

Aussi, après la course il offre son cheval à sa copine de l'époque. Erreur de stratégie ou coup du destin... ?

Sa copine le quitte quelques mois plus tard et il se trouve donc en 1974 sans cheval pour disputer la course ! Il décide malgré tout de se présenter sur la ligne de départ sans cheval et avec sa grande barbe, ses longs cheveux et sans t-shirt : plus un style de bûcheron que d'athlète.

Le début de la course était aussi le début de l'histoire des ultra-trails. Poussé par son caractère, il est parti plus vite que les chevaux sur les premiers kilomètres et il s'est vite déshydraté. Malgré tout il continuait à avancer et a réussi à dépasser certains cavaliers dont leurs montures s'étaient effondrées d'épuisement.

La course est devenue un vrai calvaire, et il a pensé souvent à abandonner mais l'encouragement d'autres participants et spectateurs l'ont poussé à continuer.

Heureusement pour lui et pour tous les amateurs de trail, il s'est aussi fait accompagner sur les derniers kilomètres par une autre fille qu'il appréciait bien et a ainsi réussi à finir la course et le premier pas de l'histoire de l'ultra-trail. L'année suivante un autre coureur

s'est aussi inscrit sans cheval, débutant ainsi la réputée Western States Endurance Run. » (1)

En **1984**, Patrick Bauer parcourt en autosuffisance 350 kilomètres dans le désert. Cette aventure va lui inspirer la création du marathon des sables deux ans plus tard. Cette année-là il est couru par 23 sportifs seulement, alors qu'ils étaient plus de 1000 à prendre le départ en 2013.

En **1989**, une bande d'amis gendarmes réunionnais crée la marche des cimes, une course qui consiste à traverser l'île de la Réunion du nord au sud. Elle se nomme maintenant le grand raid et le parcours est de 170 kilomètres avec 10000 mètres de dénivelé positif.

En **2003** est créé l'ultra-trail du Mont Blanc, course qui consiste à réaliser un tour complet du massif du Mont Blanc en passant par trois pays différents : la France, l'Italie et la Suisse. D'une distance initiale de 155 kilomètres, il est passé à 166 kilomètres en 2008 et enfin 171 kilomètres en 2018 pour 10000 mètres de dénivelé positif.

Depuis une dizaine d'années, de nombreux athlètes s'orientent vers de nouvelles activités d'endurance, voire d'ultra-endurance. Ils défient les distances et les dénivelés les plus invraisemblables. Malgré le niveau de difficulté physique et psychologique, malgré les concessions à faire pendant l'entraînement, malgré les souffrances durant la course, on retrouve dans chacune de ces courses de montagne, de plus en plus d'inscrits. On peut penser que c'est l'amour du challenge qui leur fait supporter ces douleurs. Ce sont plus que de simples athlètes surentraînés, ils courent pour conquérir l'impossible. Ainsi, ce sport d'aventure est en plein essor et les sportifs qu'on pourrait qualifier de « sportifs de l'extrême » ne cessent chaque année de repousser leurs limites physiologiques. Quelques questions se posent :

Comment l'athlète doit se préparer pour faire face à de tels challenges ?

Comment l'organisme s'adapte-t-il à de telles charges ?

Il est essentiel pour ces athlètes de comprendre comment leur organisme fonctionne, dans le but de se préparer au mieux pour leur trail.

« Comprendre pour mieux s'entraîner »



C. Le Grand Raid fête ses 30 ans cette année

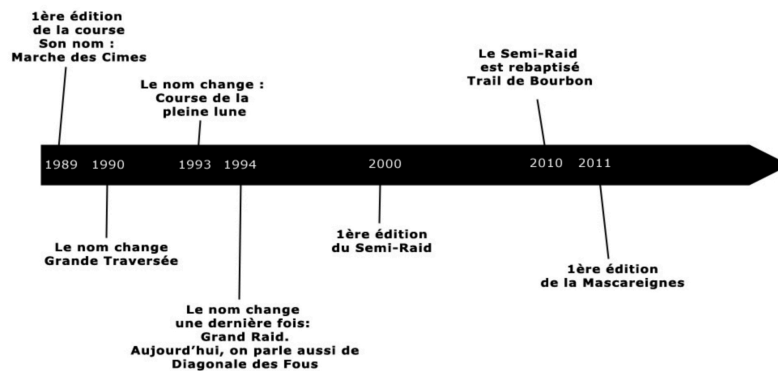


Figure 1 : Chronologie de la course qui traverse l'île de la Réunion

Un peu d'histoire.... En 1989, une poignée de passionnés décident de créer une course qui traverse l'île de la Réunion en une seule traite, et la nomme « la marche des cimes ». Elle allait de Saint Denis jusqu'à Saint Philippe et proposait 112 kilomètres de course avec 6000 mètres de dénivelés positifs.



Figure 2 : Publicité pour la marche des cimes

Le parcours de la course et son nom changent chaque année, dès 1990, la course s'appelle la Grande Traversée.

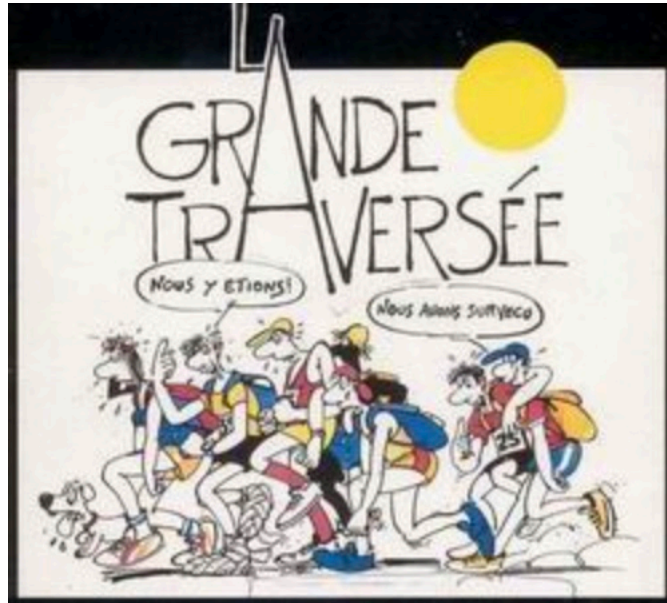


Figure 3 : publicité pour la grande traversée



Mais c'est en 1994 qu'une nouvelle équipe prend le relais et que le Grand Raid est né !



Figure 4 : Logo du Grand Raid

Le Grand Raid est un ultra-trail organisé sur l'île de la Réunion. Cette course fait partie d'une des plus difficiles du monde dans son genre et est nommée « la diagonale des fous ». Au départ c'était une course régionale avec seulement quelques participants locaux. C'est aujourd'hui une course mythique connue de tous les coureurs de longues distances. Cette course atteint son point culminant à 2800 mètres d'altitude autour du piton de la Fournaise et les températures oscillent entre 0 et 30°C. La durée de la course est assez variable, allant de 24 heures pour les meilleurs jusqu'à 67 heures pour les derniers (temps limite pour ne pas être disqualifié).

Depuis 2013, pour pouvoir prendre le départ, il est nécessaire d'avoir une expérience de trail et d'attester de la réussite à des courses de montagne ayant des dénivelés et des distances correspondants à un certain nombre de points.

Voici l'historique des distances, dénivelés et nombre de participants, année par année :

Édition	Distance	Dénivelé	Départ	Arrivée	Partants	Finishers
1989	112 km	5400 m	St Denis (Le Barachois)	Le Tremblet	500	314
1990	126 km	5200 m	Saint-Joseph (Langevin)	Le Port	950	550
1991	134 km	6500 m	Saint Joseph (Caverne des Hirondelles)	Sainte Marie (stade Duparc)	950	534
1992	124 km	6800 m	Marine de Vincenzo	Sainte Marie (mairie)	969	626

1993	129 km	6600 m	St Philippe (Cap Méchant)	La Possession	437	288
1994	130 km	6900 m	St Philippe (Cap Méchant)	La Possession	660	366
1995	121 km	6370 m	St Philippe (Cap Méchant)	La Grande Chaloupe	835	549
1996	123 km	7100 m	St Philippe (Cap Méchant)	La Grande Chaloupe	918	658
2013	167 km	10000m	St Pierre (Ravine Blanche)	Saint Denis (Stade la Redoute)	2059	1366
2014	167 km	10000m	St Pierre (Ravine Blanche)	Saint Denis (Stade la Redoute)	2206	1147
2015	163 km	10000m	St Pierre (Ravine Blanche)	Saint Denis (Stade la Redoute)	2443	1727
2016	165 km	9700m	St Pierre (Ravine Blanche)	Saint Denis (Stade la Redoute)	2440	1688
2017	165 km	9700m	St Pierre (Ravine Blanche)	Saint Denis (Stade la Redoute)	2573	1830
2018	164	6500	St Pierre (Ravine Blanche)	Saint Denis (Stade la Redoute)		

Tableau 1 : Evolution de la course du Grand Raid

Elle se déroule au mois d'octobre et chaque année le nombre de participants augmente, forçant les organisateurs à effectuer un tirage au sort. Cette année 2700 concurrents (dont 10% de femmes) venus du monde entier ont eu la chance d'y participer.

Le nombre de concurrents extérieurs est en constante augmentation. Ils étaient 60 étrangers en 1992, 160 en 1995. Ils seront plus de 900 cette année. Vingt pays sont représentés sur la ligne de départ. D'autant que de 2013 à 2017 elle se retrouve dans le classement des dix courses du circuit « ultra-trail world tour ».

Le Grand Raid comporte aujourd'hui quatre courses avec des parcours différents pour que tout le monde puisse y participer, à son niveau. (2)

La diagonale des fous consiste en la traversée de l'île, de Saint Pierre (sud) jusqu'à Saint Denis (nord) en passant par le Piton de la Fournaise, et les cirques naturels de l'île tel que Cilaos et Mafate. Au départ à Saint Pierre, le magma humain multicolore s'écoule comme un flot ininterrompu, les fous sont lancés !!!

Le parcours est long de 165 kilomètres avec un dénivelé positif de 9700 mètres.

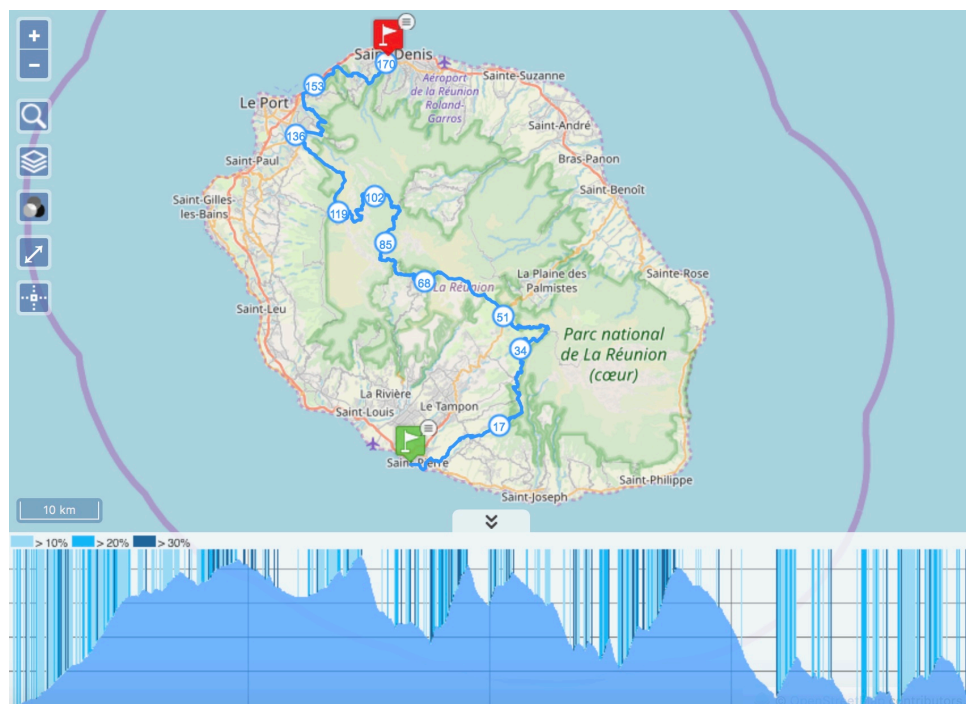


Figure 5 : Tracée de la course avec dénivelé

Le trail de bourbon lui, avec 7590 mètres de dénivelé positif et

La mascareigne est une course de 65 kilomètres de long avec un dénivelé positif de 4566 mètres.

La petite dernière, **le zembrocal trail**, est une nouveauté de l'année 2017 et est une course par équipe sous forme de relais.

Mais cette course est avant tout une expérience unique, une AVENTURE !!! (3)

Une aventure individuelle pour celles et ceux qui y participent et finissent le parcours.

Pourquoi se lancer un tel défi ? « parcequ'on est FOU » répondent en cœur les participants le jour de la remise des dossards.

Le grand raid est plus qu'une course, c'est un pèlerinage, quelques jours hors du temps.

Les coureurs ont le souhait de se dépasser physiquement mais aussi mentalement, de communier sur les sentiers.

La plupart nous disent que le trail est une vraie drogue, « quand on met le pied dedans on n'en sort plus ».

Une aventure collective dans la préparation, la logistique, le soutien de la famille et des proches, avant, pendant, et après la course. Mais aussi le soutien de ses partenaires tout au long du parcours. De nombreux bénévoles participent à cette aventure, sans qui elle serait impossible.

Une aventure patrimoniale en hommage aux ancêtres « des hauts » qui parcouraient de longs chemins à pieds pour aller vendre leur production. La marche a toujours été quelque chose de très naturel chez les réunionnais, et ce don naturel ils l'ont exploité. Beaucoup d'endroits sont encore enclavés et nécessite d'y accéder à pied ou hélicoptère tel que Mafate avec son facteur qui a fait la réputation du site.

Une aventure humaine exceptionnelle car les réunionnais ont le sens de l'hospitalité, ils reçoivent avec le cœur les étrangers sur leur île. Sur toute la course on peut ressentir cette ambiance chaleureuse, autant entre participants, qu'avec les bénévoles, qu'avec les locaux aux points de ravitaillements qui crient pour donner toute leur énergie aux traileurs.

V. L'adaptation physiologique du sportif de l'extrême

Le corps humain est parfaitement organisé en différents niveaux, chimique, cellulaire, tissulaire, organique et systémique. On le compare ainsi à une formidable machinerie. Tout est pensé et construit pour que l'homéostasie, c'est à dire la stabilité relative du milieu intérieur du corps soit maintenue.

En revanche, lors de la préparation et pendant les courses d'ultra-trail, le corps est soumis à des stimuli extrêmes. L'ultra-traileur apprend donc à connaître son corps et ses limites. Même si leur challenge est de les dépasser, il sait que la course est d'une extrême longueur et le moindre faux pas peut l'obliger à tout arrêter.

Antoine Guillon, gagnant du Grand Raid 2015, explique « On fait corps avec le plus profond de notre être, tout en sortant de son corps. »

Lors d'une activité sportive, l'apport d'énergie aux muscles permettant la contraction est nécessaire et nécessite la transformation d'énergie chimique en énergie mécanique.

L'énergie chimique provient de l'hydrolyse des molécules d'Adénosine triphosphate (ATP) en Adénosine Diphosphate (ADP) et en Phosphate inorganique (Pi).

Plusieurs voies sont impliquées dans ce processus, tel que la voie de la créatine phosphate, la voie de la glycolyse anaérobie et la voie de la phosphorylation oxydative ou voie aérobie.

A. Les différentes sources d'énergie à l'exercice

1. La voie de la créatine phosphate (CP)

Tout d'abord, la concentration en ATP dans les muscles étant très faible, l'organisme doit reconstituer ses stocks dès le début de l'exercice pour assurer la contraction des muscles. L'ADP doit être rapidement rephosphorylé par une myokinase afin d'assurer cette recharge des réserves en ATP. L'Adénosine Monophosphate (AMP) va être catabolisée en divers déchets azotés.



La voie de la créatine phosphate est une réaction réversible, de sorte que lorsque le muscle est riche en ATP, l'énergie en est récupérée pour faire de la phosphocréatine. Au contraire lorsque l'ATP redevient nécessaire, ce transfert direct restitue l'énergie mise en réserve.

Cette réaction engendre la dégradation de la créatine phosphate (CP) ou phosphocréatine en créatine via la phosphocréatine kinase, en libérant une molécule d'ATP.



La vitesse de dégradation de la créatine phosphate est dépendante de la durée et de l'intensité de l'exercice physique effectué.

L'oxygène n'est pas nécessaire à la réaction mais il est nécessaire à la resynthèse de la CP qui se fait rapidement puisqu'en quelques minutes, la totalité des réserves de CP est à nouveau disponible.

2. La voie de la glycolyse anaérobie ou voie anaérobie lactique

Cette voie qui se déroule dans le cytoplasme nécessite l'utilisation de glycogène ou glucides. Elle est stimulée par le manque d'ATP et inhibée par l'augmentation de la concentration en H⁺.

La glycolyse, première étape, permet d'obtenir deux molécules de pyruvate à partir d'une molécule de glucose via une série de réactions chimiques complexes qui entraîne la libération finale de molécules d'ATP et deux molécules de Nicotinamide Adénine Dinucléotide hydrolysé (NADH).

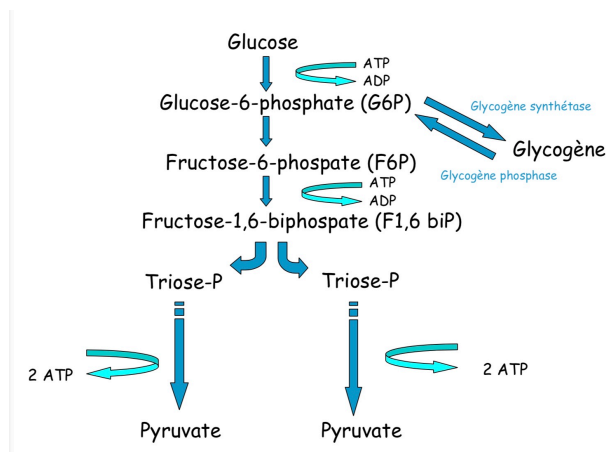
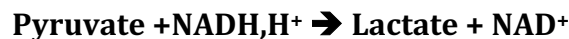


Figure 6 : La glycolyse

Dans un premier temps, l'apport en oxygène est insuffisant. Le pyruvate formé reste dans le cytoplasme et subit l'action de la Lactate Déshydrogénase : cette réaction aboutit à la formation d'acide lactique. Celui-ci est néfaste dans la mesure où il acidifie le milieu et va rapidement entraver le bon fonctionnement de la cellule, perturbant les échanges ioniques et en particulier calciques.



Les molécules de lactate vont diffuser dans le sang et seront transformés en pyruvate puis acétyl-CoA dans la majorité des tissus, ou transformés en glucose dans le foie par la néoglucogénèse lactique, ou cycle de Cori.

La production d'ATP est rapide et cette voie est donc conséquente quand l'exercice est intense et de courte durée.

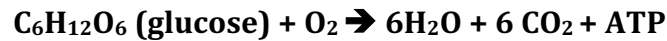
3. La voie de la phosphorylation oxydative ou voie aérobie

La voie aérobie est la voie principale de la synthèse de l'ATP dans le cas d'un exercice léger à modéré et de longue durée, ce qui est le cas dans l'ultra-trail. Elle nécessite la présence d'O₂ et utilise des substrats énergétiques qui sont principalement les lipides et les glucides. Les protéines, quant à elles, peuvent être également utilisées mais dans des proportions moindres. Leur utilisation ne représente que 5 à 10% de l'énergie totale apportée. (4)

Le métabolisme des glucides débute par les réactions de la glycolyse avec la transformation du glucose en acide pyruvique.

Au sein de la mitochondrie, le pyruvate est oxydé puis décarboxylé en Acétyl-CoA par le complexe pyruvate-déshydrogénase. Celui-ci entre dans le cycle de Krebs où il va subir de nombreuses transformations en présence de dioxygène (O₂) afin de produire de l'ATP.

La réaction qui se produit est celle-ci :



Le cycle de Krebs est une plate-forme commune au catabolisme des substrats énergétiques qui a lieu dans la matrice mitochondriale. C'est un ensemble de huit réactions qui permet d'extraire l'énergie de l'acétyl-CoA.

Un cycle produit 1 ATP, mais surtout, il va réduire 3 NAD⁺ et 1 FADH en 3 NADH, H⁺ et 1 FADH₂. C'est une machine à capter les électrons. Les coenzymes réduits vont permettre la synthèse d'ATP dans la chaîne respiratoire localisée dans la membrane interne des mitochondries. Au final, une molécule de glucose produit 38 molécules d'ATP par cette voie aérobie alactique.

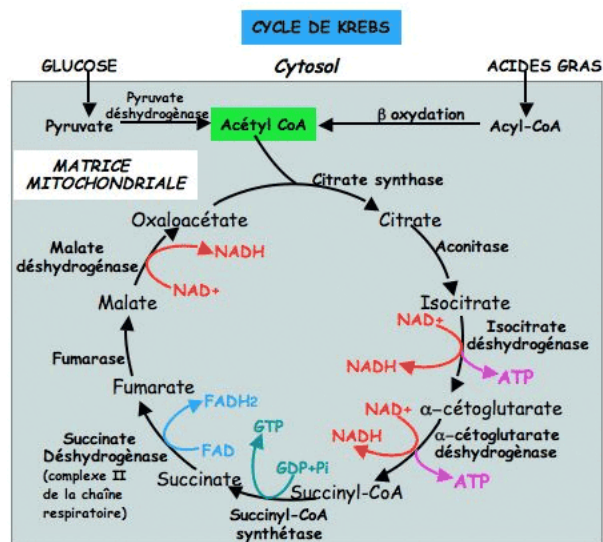


Figure 7 : Le cycle de Krebs

Le glucose a des réserves bien moins importantes et de fait il est un substrat épuisable. La forme de stockage du glucose est le glycogène et ce dernier peut être soit hépatique soit musculaire.

Suite à un repas, la répartition se fait comme suit : 25 à 30% du glucose ingéré est stocké sous forme de glycogène hépatique, 30 à 50% en glycogène musculaire, et le reste est oxydé.

Après une période d'exercice de dix à vingt minutes, les lipides vont commencer à être utilisés pour produire de l'énergie. Ils sont le substrat le plus abondant chez l'homme. On retrouve les triglycérides qui sont stockés dans les muscles chez les athlètes endurants, et les acides gras libres (AGL) qui proviennent des triglycérides du tissu adipeux.

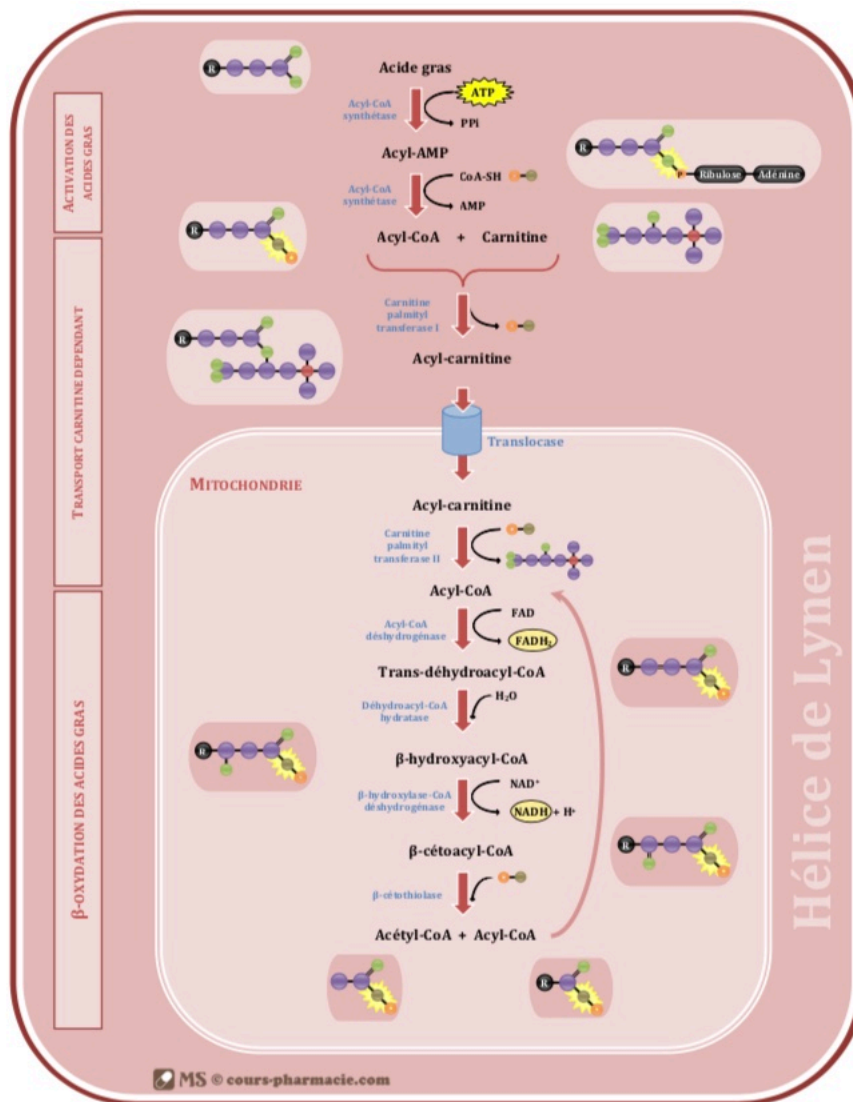


Figure 8 : La Beta-oxydation des acides gras

Avant de pouvoir contribuer à la production d'énergie, chaque triglycéride est hydrolysé en 1 glycérol et 3 AGL par une lipoprotéine-lipase, elle-même activée par les catécholamines (adrénaline et noradrénaline) libérées à l'exercice et l'insuline. Les acides gras libres sont transportés par le sang jusqu'aux mitochondries musculaires. Pour être utilisés par la mitochondrie, les acides gras sont activés par une enzyme appelée acyl-CoA synthétase, présente sur la membrane externe. Cette transformation aboutit à la formation d'acyl-CoA et nécessite l'hydrolyse d'une molécule d'ATP. L'acyl-CoA en présence de carnitine dans l'espace intermembranaire, est transformée en acyl-carnitine par la carnitine palmitoyl transférase I (CPTI). Puis l'acyl-carnitine entre dans la matrice mitochondriale par translocation, grâce à une translocase localisée dans la membrane interne. Enfin, l'acyl-carnitine est retransformée par la carnitine palmitoyl transférase II (CPTII) en acyl-CoA d'une part, qui entre dans la bêta-oxydation, et en carnitine libre d'autre part, qui retourne dans le cytosol grâce à la translocase. La bêta-oxydation est un cycle de quatre réactions (hélice de Lypen), libérant une molécule d'acétyl-CoA (deux carbones) par cycle. Le cycle se répète tant qu'il reste une

paire de carbones disponible sur l'acide gras de départ. L'acétyl-CoA produit entre dans le cycle de Krebs et la phosphorylation oxydative de manière identique aux glucides. Une molécule d'acide gras de 16 carbones totalement oxydée permettra de produire 129 molécules d'ATP, c'est-à-dire trois fois plus qu'une molécule de glucose. En revanche, la consommation d'O₂ est plus importante pour la dégradation d'un acide gras qu'une molécule de glucose.

La phosphorylation oxydative :

Les coenzymes réduits produits lors des réactions du cycle de Krebs et de la beta-oxydation, le NADH et le FADH₂, vont permettre d'alimenter la chaîne respiratoire en électrons. Ceci est l'étape finale indispensable à la production d'ATP.

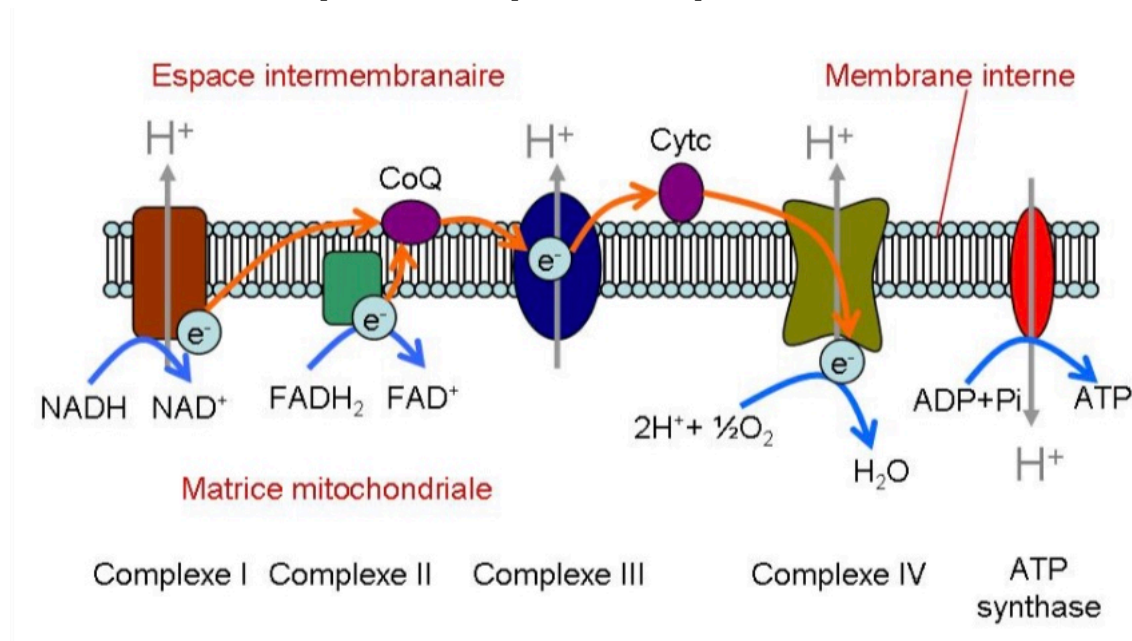
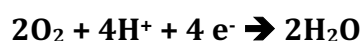


Figure 9 : Schéma récapitulatif de la phosphorylation oxydative

La chaîne respiratoire est constituée de cinq complexes fixes situés sur la membrane interne de la mitochondrie : le complexe I ou NADH déshydrogénase, le complexe II ou succinate déshydrogénase, le complexe III ou ubiquinol cytochrome c réductase, le complexe IV ou cytochrome c oxydase et le complexe V ou ATP synthase. Elle est constituée également de transporteurs spécifiques mobiles (la coenzyme Q10 et le cytochrome C). Chaque complexe est engagé dans des réactions d'oxydo-réduction et le passage des électrons à travers les différents complexes permet de transférer des ions H⁺ de la matrice mitochondriale vers l'espace inter-membranaire. Ce passage établit un gradient électrochimique de protons qui crée une force proton motrice utilisée par le complexe V pour phosphoryler des molécules d'ADP et ATP, assurant le couplage de la chaîne des oxydo-réductions avec la production d'ATP. La cytochrome c oxydase, accepteur final d'électrons de la chaîne respiratoire, est une enzyme cruciale pour la respiration mitochondriale. Elle permet de catalyser la réaction suivante :



La production de radicaux libres oxygénés :

La mitochondrie, au cœur de l'énergétique cellulaire, est en même temps à travers les complexes de la chaîne respiratoire, un des sites majeurs de production de radicaux libres oxygénés (RLO). La production de RLO correspond à la réduction de la molécule d'O₂ en anion superoxyde (O₂⁻). Classiquement, 95% de l'O₂ est réduit en eau, mais 1 à 5% des molécules sont réduites différemment et il y a alors formation de O₂⁻. D'un point de vue fonctionnel, le complexe I apparaît comme la source principale de production de RLO au niveau de la chaîne respiratoire. L'implication du complexe III est aussi démontrée mais elle nécessite des conditions physiologiques spécifiques non présentes chez le sujet sain. (5)

Il est important de noter que toute élévation du flux d'électrons augmente la production de RLO au niveau mitochondrial. Cela veut dire que la réalisation d'un exercice, d'autant plus si son intensité est élevée et les capacités de l'athlète conséquentes, se traduira par une production de RLO accrue au niveau mitochondrial.

Les protéines ont un rôle structurel et fonctionnel majeur. Leur utilisation pour la production d'énergie se fait en cas de carence des autres sources, au détriment de ses fonctions principales.

Pour produire de l'énergie, les acides aminés sont désaminés pour former un acide alpha cétonique qui pourra suivre deux voies potentielles, soit en entrant dans le cycle de Krebs, soit en formant un glucose par néoglucogénèse.

4. Les substrats à l'effort

Le sportif de haut niveau doit gérer au mieux ses réserves en lipides, glucides et protéines car l'épuisement des réserves de ces substrats est la principale limite à l'effort. La part respective de l'utilisation de ces substrats à l'exercice dépend de la durée et de l'intensité de cet exercice mais aussi de l'entraînement.

Pour maintenir un effort sur le long terme, la bêta-oxydation semble être préférable à la glycolyse oxydative pour deux raisons :

- D'une part, elle permet une production d'ATP plus importante.
- D'autre part, même les plus minces athlètes possèdent une plus grande réserve énergétique sous forme de triglycérides.

Cependant, en raison de la plus faible vitesse d'oxydation des lipides, le bénéfice en termes de production énergétique est moins important pour les lipides que pour les glucides. La durée de la bêta-oxydation dépend de la structure des lipides (longueur de la chaîne et du nombre d'insaturations), les acides gras à chaînes courtes et moyennes étant métabolisés plus rapidement que les acides gras à chaînes longues.

Un certain nombre de facteurs influencent l'oxydation lipidique tel que le sexe, la génétique et les hormones qui sont difficilement modifiables. Mais d'autres, tels que l'entraînement, l'état nutritionnel, la qualité et la quantité des graisses consommées peuvent être facilement modulés.

La théorie du « cross-over concept » de Brooks et Mercier a permis d'établir une représentation graphique de l'utilisation du glucose et des lipides à l'effort en fonction du pourcentage de $VO_2\text{max}$.

L'utilisation de ces substrats pendant l'exercice dépend du changement ou « Cross-over » entre :

- L'utilisation accrue des glucides induite par l'augmentation de l'intensité de l'exercice
- L'augmentation de l'oxydation des lipides induite par la durée de l'exercice et l'entraînement.

Le « cross-over point » est situé à l'endroit où la puissance d'exercice est telle que l'énergie provenant de l'utilisation des glucides est égale à celle provenant de l'oxydation des lipides, aux alentours de 70 à 75% du $VO_2\text{max}$, tout en sachant que ce point est variable suivant les individus. A partir de ce point, l'activité devient intense et toute augmentation de puissance entraîne une augmentation de la production d'énergie en provenance de l'utilisation des glucides et une baisse de celle provenant de l'oxydation des lipides. (6) Ceci s'explique car au-dessus de 75% de $VO_2\text{max}$, l'énergie doit être fournie rapidement et seuls les glucides peuvent le faire. A l'exercice maximal, ils sont donc les seuls utilisés.

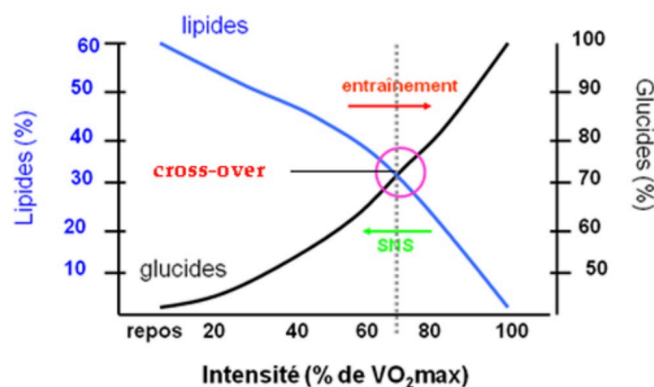


Figure 10 : La théorie du « Cross-over point »

Au repos et pour des niveaux d'exercice légers et modérés, en dessous de 70% de $VO_2\text{max}$, l'énergie peut être fournie plus lentement, il y a donc majoritairement utilisation des lipides.

En revanche, l'entraînement déplace le point de croisement vers des valeurs de puissance plus importantes et augmente la capacité à utiliser les lipides. Ainsi l'athlète économisera son glycogène et augmentera son potentiel d'endurance.

Pendant un effort de longue durée, les acides aminés entrant dans la composition des protéines musculaires, peuvent être utilisés dans le but de produire de l'énergie pour réaliser l'effort.(4)

B. Rappels physiologiques

Les adaptations de l'organisme soumis à un stimulus extérieur peuvent moduler l'homéostasie. Cela peut être le cas lors d'un exercice physique intense au cours duquel la demande en énergie et en O_2 augmente de façon trop importante. Or l' O_2 n'est pas stocké dans l'organisme, il doit être prélevé dans l'air et ensuite être apporté aux mitochondries afin de produire l'énergie nécessaire à l'organisme.

Pour ce faire, après être entré dans les poumons, l' O_2 traverse la barrière alvéolo-capillaire pour arriver dans le sang où la majorité de l' O_2 fixé sur l'hémoglobine est transportée jusqu'aux muscles. Ensuite, l' O_2 passe des capillaires aux mitochondries musculaires pour pouvoir participer à la synthèse de l'ATP.

C'est donc un trajet composé de plusieurs obstacles à surmonter que doit parcourir l' O_2 . Les différents éléments sont organisés sous forme d'une chaîne et l'ensemble représente une structure couramment appelée « chaîne cardio-respiratoire ».

Elle est constituée de différents maillons qui sont complémentaires : le maillon pulmonaire, le maillon cardiovasculaire et le maillon musculaire.

1. Maillon pulmonaire

De par sa situation anatomique, sa structure et sa fonction, l'appareil respiratoire est le premier maillon de la chaîne cardio-respiratoire et il est le seul en relation direct avec le milieu extérieur. Son but est d'apporter aux cellules l' O_2 dont elles ont besoin et d'éliminer le CO_2 produit.

a) Organisation de l'appareil respiratoire

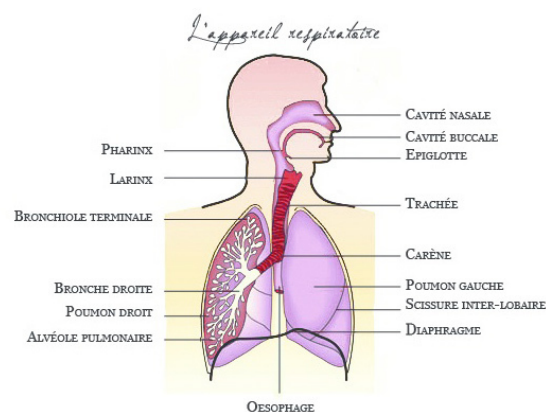


Figure 11 : Anatomie de l'appareil respiratoire

L'appareil respiratoire est constitué des voies aériennes extra-thoraciques tels que la muqueuse nasale, le pharynx, le larynx, et la partie supérieure de la trachée. Mais aussi des voies aériennes intra-thoraciques avec des bronches primaires qui vont se diviser en

bronches secondaires, tertiaires... jusqu'aux bronchioles terminales qui débouchent chacune sur plusieurs alvéoles.

Ces alvéoles, se trouvant dans la zone respiratoire de l'arborisation bronchique, ont un rôle exclusif d'échanges gazeux puisqu'elles sont en contact étroit avec les capillaires pulmonaires.

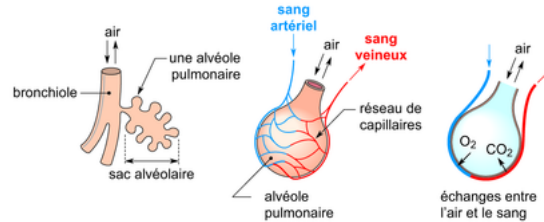


Figure 12 : Les échanges gazeux

La communication entre le milieu extérieur et le milieu intérieur est possible par la paroi alvéolo-capillaire, qui est le résultat de la fusion de l'épithélium alvéolaire et l'endothélium capillaire. Celle-ci est extrêmement sensible aux fortes pressions. Mais au-delà de cette organisation, l'appareil respiratoire est en réalité composé de deux poumons, le droit constitué de trois lobes, et le gauche constitué de deux lobes. Ils sont situés dans la cage thoracique et reposent sur le diaphragme. (7)

C'est la mise en action intégrée de ces éléments qui va permettre à l'appareil respiratoire de remplir son premier rôle, faire entrer l'air et donc l'oxygène dans l'organisme.

b) Comment l'air entre-t-il dans les poumons ?

L'air est un mélange de plusieurs gaz, constitué de 21% de dioxygène, de 78% de diazote et de 1% d'autres gaz tel que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'ozone..

Le phénomène d'inspiration, dicté par les lois de la mécanique ventilatoire, commence par la contraction des muscles inspiratoires tel que le diaphragme et les éleveurs des côtes. Le diaphragme a un rôle fondamental lors de l'inspiration. Il s'attache sur le rachis en arrière et sur les côtes en avant. Lors de sa contraction il descend, ce qui augmente le volume de la cage thoracique. (7)

Cette modification géométrique va entraîner des changements de volume de la cage thoracique et donc des changements de pression (loi de Boyle-Mariotte). A ce moment - là, la pression alvéolaire (PA) est plus basse que la pression atmosphérique (Patm). Suivant la loi de l'écoulement des gaz, l'ensemble des gaz constituant l'air va entrer dans les poumons jusqu'à ce que PA égale Patm.

Ainsi, il y a par unité de temps une quantité d'air qui entre dans les poumons, c'est la ventilation globale (VE) en Litre par minute (L/min). Suivant le statut des individus et leur environnement, la façon de ventiler peut-être différente.

Le régime ventilatoire est directement lié à deux paramètres ventilatoires importants : la fréquence respiratoire (fr) en cycle respiratoire par minute, et le volume courant (VT) en litres (L), de telle sorte que :

$$VE = fr \times VT$$

Lors d'un exercice à charge progressivement croissante, la cinétique de VE est marquée par la présence de deux « décrochages » ventilatoires à l'origine de la détermination des seuils ventilatoires.

Ces seuils ventilatoires sont au nombre de deux et sont déterminés exclusivement suite à la réalisation d'une épreuve d'effort maximal avec mesure des échanges.

Ces seuils sont individualisés, dépendent du niveau physique de la personne et sont importants pour les athlètes endurants puisqu'ils permettent de caractériser de manière indirecte le niveau de performance aérobie d'un sujet.

- **SV1** est situé au point permettant d'observer une première augmentation nette de la VE, d'observer également une augmentation de l'équivalent respiratoire en O₂ (VE/VO₂), alors que l'équivalent respiratoire en CO₂ (VE/CO₂) reste constant. (8)
- **SV2** est situé au point permettant d'observer une deuxième augmentation nette de VE, une seconde augmentation de l'équivalent respiratoire en O₂ (VE/VO₂) et une augmentation de l'équivalent respiratoire en CO₂ (VE/VCO₂).

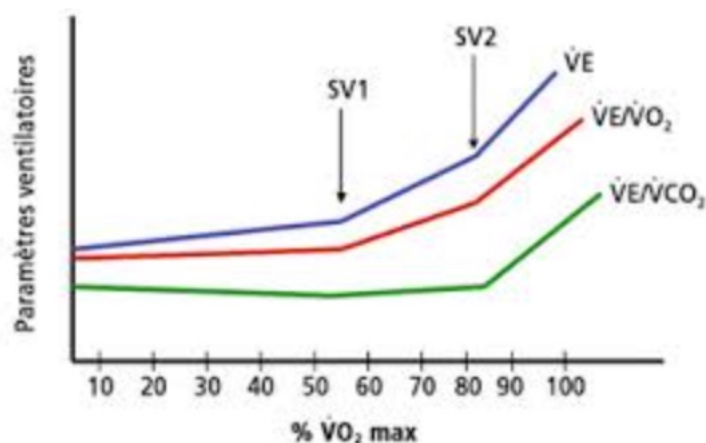


Figure 13 : Détermination des seuils ventilatoires

La notion de seuil, liée à la zone de transition aérobie-anaérobie est à mettre en relation avec l'accumulation d'acide lactique dans l'organisme.

Le premier décrochage ventilatoire SV1 est concomitant avec une apparition d'ions H⁺, associés à la production intracellulaire d'acide lactique, qui sont tamponnés par les ions bicarbonates (HCO₃⁻). Cela induit un excès de CO₂ qui stimule la ventilation en réponse aux variations de la concentration sanguine en CO₂ détectées par les chémorécepteurs centraux et périphériques. (9) (10)

A partir d'une certaine intensité lors d'un exercice en condition aérobie, le métabolisme anaérobie contribue pour fournir de l'énergie.

Au stade du deuxième seuil ventilatoire SV2, le tamponnage par les bicarbonates des lactates est dépassé et il y a accumulation de H^+ , s'accompagnant d'une baisse du pH sanguin et musculaire entraînant une acidose. Ces ions diffusent progressivement du compartiment musculaire au compartiment sanguin. Cette augmentation stimule les chémorécepteurs périphériques et induit une deuxième hyperventilation. (11)

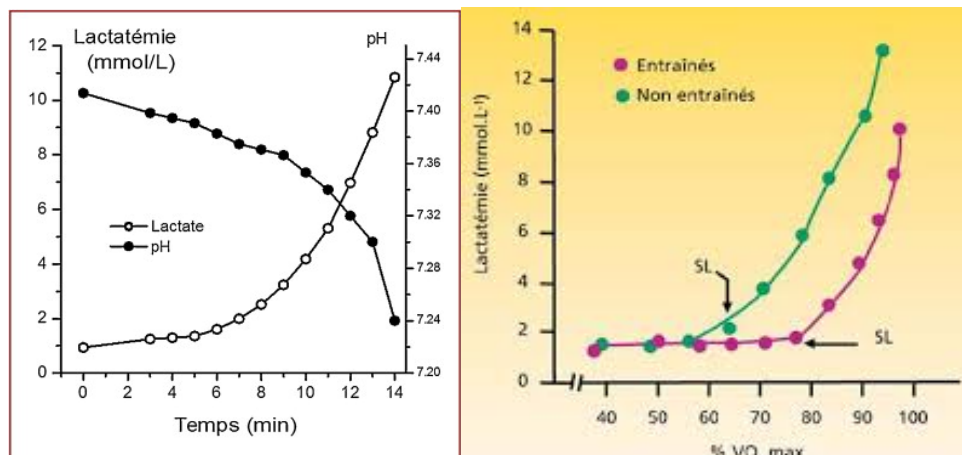


Figure 14 : Evolution de la lactémie en cours d'exercice

En moyenne, SV1 est situé entre 50-60% de VO_2max et SV2 entre 70-80%.

Mais chez un athlète entraîné en endurance, les seuils sont plus tardifs.

Vers 85% du VO_2max , c'est le seuil anaérobie, toute augmentation de l'allure provoque une montée brutale des lactates et réduit la poursuite de l'effort. Le taux de production des lactates est supérieur à son taux d'élimination.

VO_2max se définit comme la quantité maximale d'oxygène qu'un sujet peut utiliser par unité de temps. Lorsqu'un sujet passe de l'état de repos à celui d'exercice, sa consommation d' O_2 augmente de manière proportionnelle à l'intensité de l'effort, tout en ayant une limite, le VO_2max . (12)

Cette constante se détermine lors d'une épreuve d'effort à charge croissante amenant le sujet à épuisement et correspond à la valeur obtenue lorsque le sujet atteint l'épuisement ou plus précisément lorsque la consommation d' O_2 reste stable malgré l'augmentation de l'intensité.(13)

Différents modes ventilatoires existent, à savoir nasale, oro-nasale ou seulement orale. La ventilation en mode nasale se retrouve dans les exercices de repos ou d'effort très léger. Plus l'intensité de l'exercice augmente et plus le sujet passe d'une ventilation oro-nasale à une ventilation purement orale. Le niveau d'entraînement du sportif va influencer le moment du passage à ces différents modes ventilatoires. Plus il est entraîné en endurance, plus il sera capable de ventiler en mode nasal puis oro-nasal pour des activités d'intensités élevées, préservant la qualité de ces échanges gazeux.

A l'inspiration, quel que soit le mode ventilatoire utilisé, l'air passe par les voies aériennes supérieures où il est réchauffé et humidifié par les muqueuses, ce qui contribue à diminuer la pression partielle des gaz contenus dans l'air ambiant.

c) Comment l'O₂ passe-t-il de l'air dans le sang ?

Le passage de l'O₂ alvéolaire dans le sang se fait par le phénomène de diffusion, phénomène purement physique. Celui-ci est soumis à des facteurs qui jouent sur le fonctionnement tel que le gradient de pression de part et d'autre de la membrane alvéolo-capillaire, la surface d'échanges, et l'épaisseur de la membrane.

Malgré quelques pertes d'air dues à des espaces morts anatomiques et physiologiques négligeables, la pression alvéolaire reste toujours supérieure à la pression artérielle en O₂.

Une fois passé la membrane alvéolo-capillaire, l'O₂ se retrouve dans le sang sous deux formes :

- Une forme libre, dissoute, indispensable au fonctionnement cellulaire mais faible en quantité (1,5%). Elle est mesurée en tant que pression partielle artérielle (PaO₂).
- Une forme combinée à l'hémoglobine des globules rouges, indispensable à l'oxygénation tissulaire. Elle représente 98,5% et est mesurée en tant que saturation artérielle de l'hémoglobine en O₂ (SaO₂).

L'hémoglobine possède un pouvoir oxyphorique, qui est la capacité du sang à transporter l'oxygène. Elle est composée de quatre chaînes de globines qui ont chacune un hème portant un atome de fer. La prise en charge de l'O₂ se fait sur cet atome de fer par une liaison réversible sans modification du niveau d'oxydation du fer. Une molécule d'hémoglobine peut donc transporter jusqu'à quatre molécules d'O₂. Mais la présence d'O₂ à proximité d'un des hèmes induit tout de même un changement de disposition de l'atome de fer par rapport au plan de la molécule.

Une fois l'O₂ fixé sur son hème, l'hémoglobine se transforme en oxyhémoglobine.

On appelle saturation de l'hémoglobine la proportion de molécules présentes sous la forme oxygénée. Celle-ci s'exprime en pourcentage.

La relation entre la forme dissoute et la forme combinée est représentée par la courbe de Barcroft, courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine. (14) Elle met en relation la saturation de l'hémoglobine en O₂ et la pression partielle en oxygène.

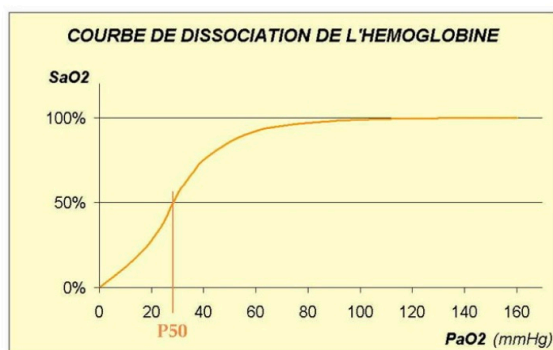


Figure 15 : Courbe de dissociation de l'hémoglobine

Cette courbe montre à partir de quels seuils la libération d'O₂ par l'Hb est significative. Dans sa phase ascendante, de faibles différences de PaO₂ entraîneront d'importants échanges d'O₂ et donc de grandes modifications de SaO₂.

Par contre dans la phase de plateau, l'oxyhémoglobine est quasi totalement saturée quelle que soit la PaO₂.

La transition entre ces deux comportements très différents se situe aux environs d'une PaO₂ de 60mmHg, correspondant à une SaO₂ de 90%.

L'O₂ consommée par les cellules est sous forme libre, donc lorsque cette forme n'est pas en quantité suffisante pour subvenir aux besoins de la cellule, l'oxyhémoglobine en libère une partie de son stock.

Les facteurs physiologiques susceptibles de modifier l'affinité de l'hémoglobine à l'O₂ sont le pH, le CO₂, la température tissulaire, et la concentration en 2,3 DPG (Di Phospho Glycérate). Leur but est de favoriser la libération des molécules d'O₂ dans les capillaires tissulaires, et de favoriser la fixation des molécules d'O₂ dans les capillaires pulmonaires.

Transport de l'oxygène

Modification de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène

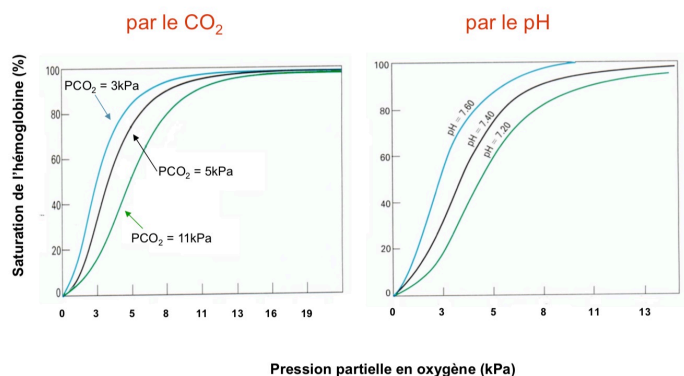


Figure 16 : Courbe de saturation de l'hémoglobine

d) *Les volumes et capacités du système*

Si le sujet est sain, le système pulmonaire n'est pas un facteur limitant. Cependant il est très important d'effectuer un test de spirométrie afin d'évaluer le fonctionnement ou dysfonctionnement de ce système. Le principal paramètre mesuré est le volume expiratoire maximal par seconde (VEMS) qui permet d'explorer l'arbre bronchique dans sa totalité. Un autre paramètre de choix est le rapport de Tiffeneau, qui est égal à $VEMS/CVF$ (capacité vitale forcée). Un VEMS et un rapport de Tiffeneau diminué doivent faire penser à une pathologie obstructive.

Lors d'un test de spirométrie on détermine :

- Le VT (volume courant ou volume Tidal) représente l'amplitude de respiration
- Le VRI (volume de réserve inspiratoire) qui est le volume de mobilisable lors d'une inspiration classique
- Le VRE (volume de réserve expiratoire) qui est le volume de mobilisation lors d'une expiration classique
- Le CV (capacité vitale) = $VT + VRI + VRE$

2. *Maillon cardiovasculaire*

L'appareil cardiovasculaire en jouant son rôle de pompe, a un rôle important dans l'organisme. Il permet d'acheminer le sang riche en O_2 des poumons au cœur et le sang pauvre en O_2 du cœur aux poumons. Ceci est la circulation pulmonaire.

La circulation systémique est celle qui permet d'acheminer le sang riche en O_2 du cœur aux tissus et le sang pauvre en O_2 des tissus au cœur.

Ce sang transporte également le CO_2 , des nutriments provenant de la digestion et des hormones issues des multiples sécrétions organiques.

a) *Le sang*

Le sang est un tissu conjonctif liquide et spécialisé qui contient de nombreux éléments figurés. Tout d'abord les globules rouges, qui sont caractérisés par leur contenu principal, l'hémoglobine. La durée de vie des globules rouges étant limitée, la question est de savoir comment renouveler leur stock. L'érythropoïèse se fait dans la moelle osseuse en trois à cinq jours, sous l'influence de l'hormone érythropoïétine (EPO), du fer et de la vitamine B. L'EPO qui, quand elle est d'origine endogène est tout à fait licite, est sécrétée par les cellules rénales lorsque celles-ci sont en hypoxie. Cette hypoxie peut être due à une prise d'altitude classique, une hémorragie, un problème respiratoire ou un exercice.

Le sang se compose également de globules blancs ou leucocytes qui sont responsables de notre immunité, mais aussi de plaquettes qui sont des fragments de grosses cellules ayant un rôle majeur dans la coagulation du sang.

Ces éléments figurés flottent dans une matrice, le plasma, qui est constitué d'eau et de quelques protéines tel que l'albumine.

Le rapport des éléments figurés sur le volume total sanguin représente l'hématocrite. Le volume total varie d'un individu à l'autre mais est en moyenne de cinq litres.

b) Les vaisseaux sanguins

Le système vasculaire est composé d'artères qui se divisent en artérioles puis en capillaires au niveau des lits capillaires des tissus. La pression artérielle se caractérise par la pression artérielle systolique (PAS), qui est mesurée pendant la contraction du cœur et la pression artérielle diastolique (PAD), mesurée pendant le relâchement.

$$\Delta P = Q_c \times R$$

C'est-à-dire que le delta pression (différence entre la pression initiale et la pression finale) est égale au produit du débit cardiaque et des résistances à l'écoulement du sang. Le système vasculaire se compose également de veines qui sont dotées de caractéristiques anatomiques visant en partie favoriser le retour veineux : large lumière, faible résistance, faible pression, présence de valvules anti-reflux.

La qualité du retour veineux est essentielle au remplissage du cœur et à son fonctionnement. Il est favorisé par la pompe musculaire qui effectue un massage par alternance de contraction-relâchement des muscles profonds sur les veines profondes des membres inférieurs notamment.

Entre les artères et les veines se trouvent les capillaires, petits vaisseaux sanguins organisés en réseaux ou lits capillaires. Comprendre comment ils fonctionnent permet de comprendre que certaines choses ne peuvent être réalisable, comme réaliser un exercice après un repas très riche en calories, ou dans un froid intense. Après un repas très copieux, les lits capillaires du système digestif seront grands ouverts pour faciliter la digestion mais ceux des muscles seront donc en partie fermés. Les muscles ne vont pas recevoir suffisamment de sang nécessaire à l'exercice et ne vont pas fonctionner correctement.

Les lits capillaires sont composés d'une dérivation qui relie directement l'artériole et la veinule. Mais il y a aussi des capillaires vrais qui émanent de ramification de l'artériole et qui ont à leur base un sphincter. Si les sphincters sont relâchés, alors le sang passe par les capillaires vrais et il y a un échange avec les tissus, si ceux-ci sont contractés, le sang passe obligatoirement par la dérivation et n'entraîne aucun échange avec les tissus. (7)

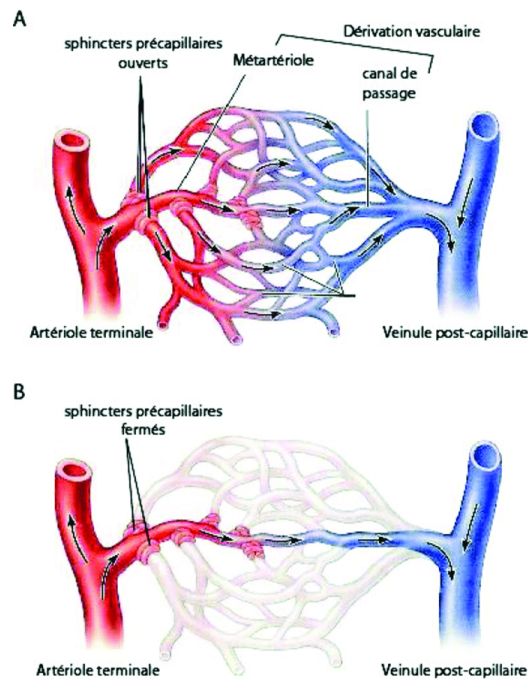


Figure 17: Anatomie des lits capillaires

c) Le cœur

Le cœur est un muscle caractérisé par le tissu myocardique protégé par le péricarde, et des cavités qui sont au nombre de quatre, deux oreillettes et deux ventricules. Entre ces cavités se trouvent des valves qui permettent la circulation du sang à sens unique. Ce muscle est particulier car il a la capacité de se contracter seul, sans l'intervention du système nerveux central. Ceci est dû à la présence de cellules cardionectrices dans le tissu myocardique qui engendre des dépolarisations puis génère spontanément des potentiels d'action à une fréquence modulée en permanence en fonction des besoins de l'organisme. Chaque dépolarisation est suivie d'une contraction.

Le cycle cardiaque est constitué de quatre phases distinctes mais successives :

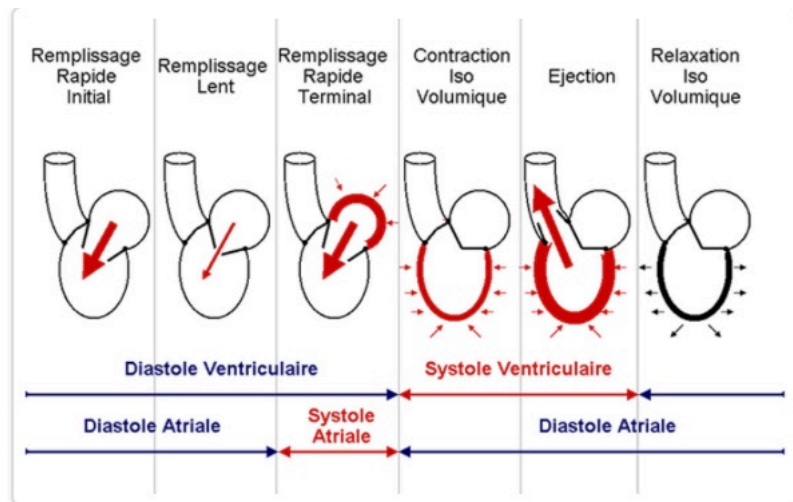


Figure 18 : Le cycle cardiaque

- Le remplissage ventriculaire :

Le remplissage ventriculaire est d'abord rapide, puis de plus en plus lent jusqu'à la contraction auriculaire.

Un supplément de sang est alors brusquement déplacé de l'oreillette vers le ventricule. Le volume ventriculaire est maximal en fin de diastole et on le nomme volume télédiastolique (VTD).

- La contraction iso-volumique :

Suite à la dépolarisation auriculaire, le ventricule se contracte. C'est le début de la systole ventriculaire.

La pression intra-ventriculaire augmente rapidement et dépasse la pression qui règne dans l'oreillette. De ce fait, les valves auriculo-ventriculaires se ferment, empêchant tout reflux.

- La phase d'éjection systolique :

Elle débute lorsque le gradient de pression permet l'ouverture des valves et l'expulsion du sang.

Le volume d'éjection systolique (VES) ne constitue qu'une partie du volume télédiastolique.

Le résidu post-systolique, le VTS (volume télésystolique), constitue un volume de réserve utilisable pour augmenter le volume d'éjection suivant.

- La relaxation iso-volumétrique :

En suivant la fermeture des valves aortiques et pulmonaires, le sang est bloqué dans le ventricule. C'est le premier temps de la diastole ventriculaire.

d) La fonction cardiaque

Le système cardio-vasculaire présente des capacités limitées même si son adaptation à l'effort est impressionnante.

- La fréquence cardiaque F_c :

Elle représente le nombre de battements cardiaques par minute. Elle est facilement mesurable mais particulièrement instable en fonction du taux de stress, du moment de la journée, de la phase du cycle menstruel pour la femme, et surtout très individuelle en fonction de l'âge et du niveau d'entraînement.

Pour autant, elle reste le moyen le plus simple d'étudier l'adaptation du cœur à l'effort. Celle-ci augmente proportionnellement à l'intensité de l'exercice effectué, ce qui signifie que selon la contrainte appliquée au système, le délai d'adaptation sera plus ou moins long. S'adapter signifie atteindre le niveau de F_c pour lequel il y a une adéquation entre les apports et les besoins en O_2 .

- Le volume d'éjection systolique VES :

Le VES correspond au volume de sang éjecté par le ventricule à chaque systole. Il dépend de la force de contraction du ventricule et de l'ensemble des forces qui s'y opposent. Cette force de contraction est réglée par un mécanisme intrinsèque (la loi de Starling) et des mécanismes extrinsèques (système nerveux autonome, hormones, médicaments). La loi de Starling stipule que tout étirement des fibres myocardiques entraîne une augmentation de leur contractilité. (15)

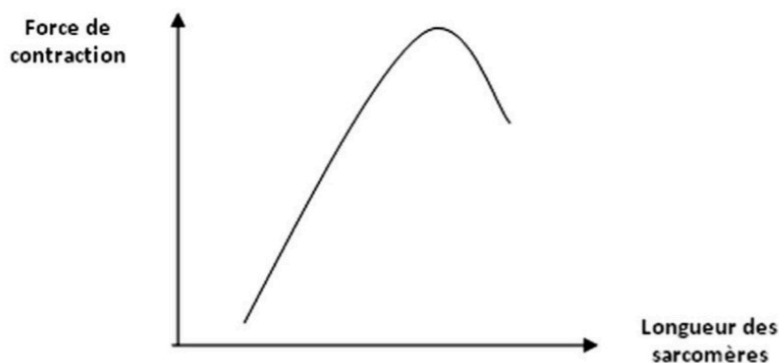


Figure 19 : Représentation de la loi de Starling

Le VES est un paramètre qui ne peut augmenter de plus du double de sa valeur de repos, ce qui fixe la notion de limite cardiaque !

$$\text{VES} = \text{VTD} - \text{VTS}$$

En cas d'augmentation du VTD il existe une augmentation du VES et donc du débit cardiaque par augmentation de la force de contraction ventriculaire.

- Le débit cardiaque Q_c :

Le débit cardiaque correspond à la quantité de sang éjecté par chaque ventricule par minute.

$$Q_c = F_c \times VES$$

Sa norme au repos est de 5 L/min environ mais varie en fonction des conditions tel que l'effort, l'état d'hydratation, l'anémie, la grossesse...

Il varie en fonction de deux composantes qui sont la pré-charge et la post-charge. La pré-charge correspond au sang qui entre dans les ventricules avant leur contraction et la post-charge est l'ensemble des contraintes qui s'exercent sur la paroi ventriculaire pendant sa contraction. La post-charge est proportionnelle à la pression et au diamètre du ventricule et inversement proportionnelle à l'épaisseur de la paroi.

Le débit cardiaque diminue en cas d'augmentation de la post-charge (exemple : hypertension artérielle, rétrécissement aortique), et en cas de diminution de la pré-charge (exemple : déshydratation, hypovolémie).

Lors d'effort intense, le débit cardiaque va augmenter puisque la F_c et le VES vont tous les deux augmenter. Plus l'effort se prolonge et plus le débit cardiaque va augmenter, pouvant aller jusqu'à cinq à six fois sa valeur initiale.

Il peut être mesuré de différentes manières dont les plus utilisées sont la mesure par l'échographie cardiaque ou par cathétérisme droit.

Souvent le débit cardiaque est indexé à la surface corporelle, on parle alors d'index cardiaque (IC) dont la norme est 3,5 L/min/m².

3. Maillon musculaire

Les deux maillons précédents ont permis à l'oxygène, aux nutriments et aux hormones d'être acheminés jusqu'au muscle, qui va les consommer.

Au repos, on peut noter une différence de concentration en O₂ entre l'entrée du système (artérielle) et la sortie (veineuse).

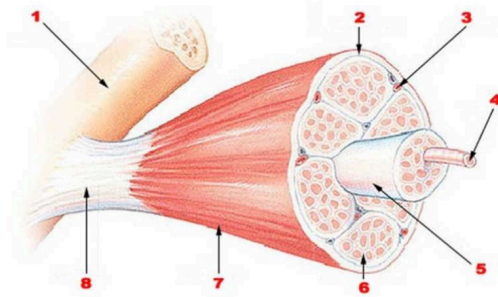
En fonction de l'intensité de l'exercice, on observe une augmentation plus ou moins importante de la différence de concentration artério-veineuse en O₂ dû à une augmentation des besoins.

Cette consommation du muscle en O₂ est directement liée aux phénomènes de resynthèse de l'ATP, utilisé pour créer et entretenir le mouvement.

a) *Le muscle squelettique*

Un muscle squelettique est constitué de milliers de cellules musculaires de forme cylindriques appelées fibres musculaires. Chacune est entourée par une fine couche de tissus conjonctif, l'endomysium qui la sépare des autres fibres. Plusieurs fibres musculaires forment un faisceau entouré par le pérymysium. Tandis que l'épymysium enveloppe l'ensemble des faisceaux, c'est-à-dire le muscle entier. Ces différentes

enveloppes conjonctives se réunissent pour former un tissu dense et solide, le tendon, permettent aux muscles de les attacher aux os.



Structure d'un muscle strié squelettique
1 Os – 2 Pérимыsium – 3 Vaisseau sanguin – 4 Fibre – 5 Faisceau –
6 Endomysium – 7 Épимыsium – 8 Tendon

Figure 20 : Anatomie d'un muscle strié squelettique

Le muscle squelettique a pour unité fonctionnelle la fibre musculaire. Celle-ci est une cellule particulière, le myocyte, constituée d'une membrane, le sarcolemme, d'un cytoplasme, le sarcoplasme, de plusieurs noyaux et de myofilaments contractiles qui font la spécialité de la cellule.

Les myofilaments sont constitués de deux protéines, l'actine et la myosine.

Lorsque qu'on observe une fibre musculaire au microscope, on peut observer une alternance de bandes claires et de bandes sombres qui lui donne un aspect strié.

Les bandes claires sont dits isotropes (bandes I), ce qui signifie qu'elles laissent passer la lumière. Ceci s'explique par la seule présence des filaments fins constitués principalement d'actine et de tropomyosine.

A l'inverse, les bandes sombres sont dites anisotropes (bandes A). A cet endroit on peut observer la présence des filaments fins mais également des filaments épais constitués de myosine.

La bande I est séparée en deux parties par la ligne Z. L'unité comprise entre deux lignes Z s'appelle le sarcomère, qui est l'unité fonctionnelle de la cellule musculaire. C'est à l'intérieur de cette unité fonctionnelle que la contraction musculaire va se dérouler, principalement sous l'effet d'une interaction entre les filaments fins et épais aboutissant à un raccourcissement du sarcomère. (7)

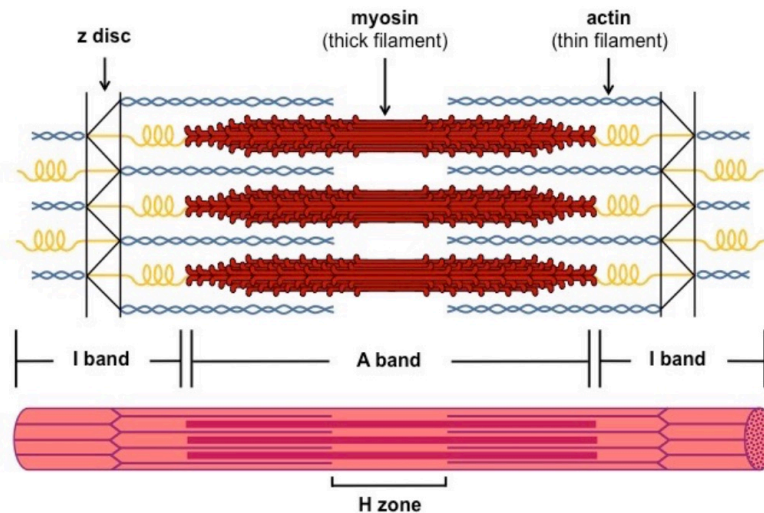


Figure 21 : Détails d'une fibre musculaire

La myosine est une protéine constituée de deux chaînes de polypeptides entrelacés avec une double tête sphérique à chaque extrémité correspondant aux ponts d'union. Les ponts d'union lient les filaments de myosines aux filaments fins d'actine pendant la contraction musculaire mais lient aussi l'ATP et l'ATPase.

L'actine est constituée de deux chaînes enroulées de sous unités d'actine présentant chacune un site de fixation des ponts d'union, de la tropomyosine, et de la troponine. La tropomyosine permet de bloquer les sites de l'actine au repos.

La troponine à une structure complexe et permet de se lier au calcium, sans lequel la contraction musculaire ne pourrait avoir lieu.

b) La contraction musculaire

Celle-ci fait intervenir des mécanismes chimiques et mécaniques. Elle se fait par glissement cyclique des filaments épais et fins, sans changement de longueur.

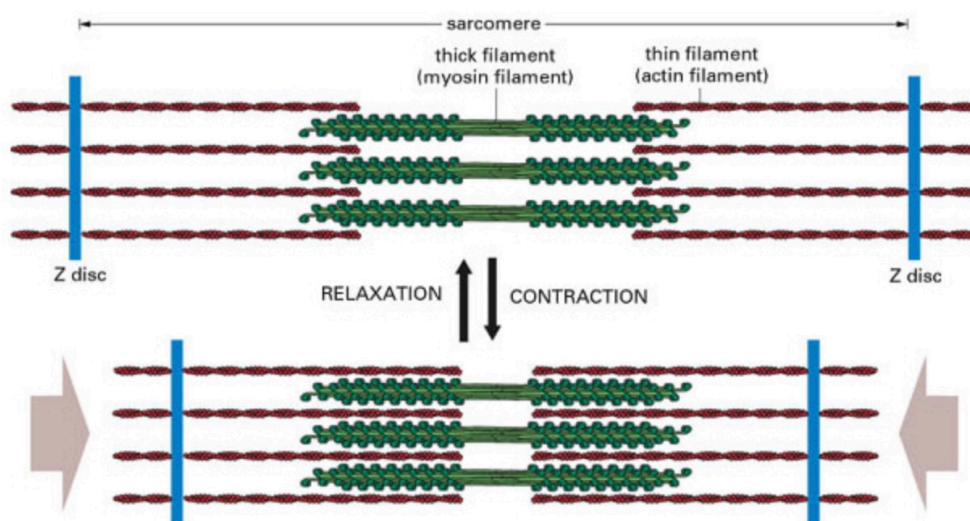


Figure 22 : Schéma de la contraction musculaire

Ce processus complexe se déroule en plusieurs étapes qui permettent de transformer une énergie chimique en énergie mécanique à partir d'une décharge électrique.

La première étape correspond à l'arrivée du potentiel d'action au niveau de la fibre musculaire. Celui-ci, émis par le système nerveux, arrive au niveau des tubules transverses (tubules T) qui sont des invaginations du sarcolemme, c'est l'étape de l'excitation musculaire.

La deuxième étape est celle du couplage excitation-contraction et correspond à la libération dans le cytoplasme du calcium présent au niveau du réticulum sarcoplasmique.

Vient ensuite l'étape de la contraction musculaire proprement dite. Le calcium libéré vient se fixer sur la sous-unité spécifique de la troponine et va découvrir les sites de fixation des ponts d'union via un décalage de la tropomyosine qui les cachait jusqu'alors. Les têtes de myosine se lient aux filaments d'actine, pivotent, et passent en configuration basse énergie et les filaments d'actine sont tirés vers le centre du sarcomère. La liaison devient de plus en plus lâche et les têtes de myosine se détache, laissant une molécule d'ATP se fixer.

L'hydrolyse de cet ATP libère de l'énergie et les têtes de myosine, en configuration haute énergie, se retrouvent sous tension et sont activées pour la prochaine phase de contraction.

La contraction musculaire est assurée tant qu'il y a de l'ATP et du calcium en quantité suffisante pour inhiber le système troponine/tropomyosine. Lorsque la stimulation nerveuse s'arrête, le calcium est re-pompé vers le réticulum sarcoplasmique et le système troponine/tropomyosine reprend son pouvoir inhibiteur. L'actine et la myosine restent alors séparées, c'est l'étape de la décontraction.

c) Les différents types de fibres musculaires

Ce sont les caractéristiques morphologiques différentes de ces fibres qui induisent les propriétés contractiles différentes.

Les fibres musculaires sont classées selon :

- La vitesse de contraction de la fibre musculaire
- La vitesse à laquelle l'ATP est hydrolysé
- Les voies privilégiées de resynthèse de l'ATP

On retrouve trois types de fibres, les fibres de type I et les fibres de type IIa et IIb.

Les fibres de type I sont innervées par un petit motoneurone, elles ont une fréquence de décharge faible et un délai de contraction important. C'est pourquoi on les nomme fibres musculaires lentes. Elles ont une force maximale faible mais une résistance à la fatigue très importante. Ce sont des fibres qui ont également la caractéristique d'avoir une faible surface de coupe. C'est la raison pour laquelle les marathoniens ont des muscles moins volumineux que les sprinters.

Elles ont également un nombre de capillaires par fibre beaucoup plus important permettant un meilleur afflux sanguin et donc une meilleure oxygénation et un nombre de mitochondries par fibre beaucoup plus important, ce qui permet de synthétiser beaucoup plus d'énergie à partir de l'oxygène.

A l'inverse, les fibres de types IIb sont innervées par de gros motoneurones. Elles ont une fréquence de décharge beaucoup plus importante et un délai de contraction faible, ce sont des fibres musculaires dites rapides. Elles ont une force maximale importante mais une très faible résistance à la fatigue. Elles ont une surface de coupe beaucoup plus importante mais un nombre de capillaires par fibre plus faible ce qui explique la plus grande fatigabilité. Le nombre de mitochondries par fibre est également faible, ce qui explique que les réactions énergétiques ne se déroulent pas dans la mitochondrie et n'utilisent pas d'oxygène pour la synthèse d'ATP.

Les fibres de type IIa, elles, sont des fibres dites intermédiaires.

C. Réponses physiologiques aux conditions extrêmes

Le but de l'entraînement est de créer des perturbations physiologiques et biochimiques afin d'engendrer des adaptations du corps. Ce sont ces adaptations fonctionnelles et organiques qui peuvent moduler l'homéostasie et permettent d'accroître les performances physiques.

Cela peut être le cas lors d'une exposition à l'altitude ou lors d'un exercice physique intense au cours duquel la demande en énergie et en O₂ augmente de façon trop importante. Comme nous venons de le voir juste avant, la cellule musculaire consomme de l'énergie lors des contractions nécessaires aux différents gestes ou déplacements sportifs. Les systèmes ventilatoires, cardiovasculaires, métaboliques et hormonaux vont s'adapter afin de permettre la synthèse énergétique. Il y a une véritable synergie d'adaptation des grandes fonctions physiologiques asservies à l'exercice musculaire.

1. Maillon pulmonaire

a) *Conséquences de l'entraînement sur la ventilation*

Chez un athlète entraîné en endurance, nous pouvons noter une modification du régime ventilatoire dont une baisse de la ventilation, de la fréquence respiratoire et une plus grande contribution du volume courant à l'effort. Ceci s'explique par la diminution des résistances au niveau des voies aériennes mais aussi par des plus grandes compliances thoracique et pulmonaire consécutives à l'entraînement.

Cette adaptation a pour conséquence une meilleure efficacité pulmonaire, avec une ventilation moins « superficielle », ainsi qu'une ventilation moins coûteuse, rendant disponible une plus grande quantité d'énergie pour les muscles impliqués dans le mouvement.

En revanche, à l'exercice maximal, le sujet entraîné présente des valeurs de la ventilation globale maximale plus élevées que celle du sujet sédentaire, et ceci est à mettre en relation avec la capacité d'atteindre de plus grandes valeurs de \dot{V}_E max tandis que le volume courant maximum bouge peu. Dès lors il est fréquent de mesurer chez des athlètes endurants de très bon niveau des valeurs de \dot{V}_E max de l'ordre de 200 litres par minute.

Lors d'un exercice, la courbe de Barcroft est déplacée vers la droite dû à une augmentation de la température interne et de la concentration en 2,3 DPG et une diminution du pH. Ceci induit, à même P_{aO_2} , une chute de S_{aO_2} se traduisant par une libération de l' O_2 par l'hémoglobine.

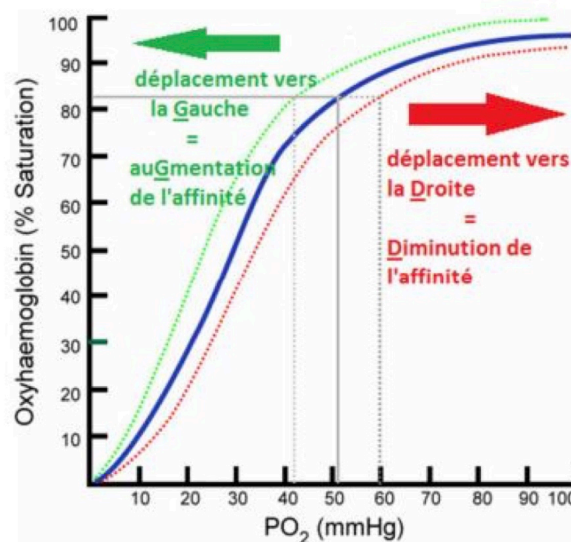


Figure 23 : Courbe de Barcroft

b) Impact sur les seuils ventilatoires

Chez les athlètes entraînés en endurance, l'apparition des deux seuils ventilatoires est retardée. Ceci s'explique par une diminution des niveaux de \dot{V}_E à l'exercice sous-maximal qui correspond à une hypoventilation. Celle-ci fait suite à une diminution des ions H^+ qui diminue la stimulation des centres respiratoires du bulbe rachidien via les chémorécepteurs.

L'hypoventilation peut aussi être mise en relation avec une moindre production de CO_2 et donc une diminution de la stimulation des centres respiratoires. Celle-ci est dû à un déplacement de l'oxydation des hydrates de carbone au profit de celle des lipides.

- SV1 de l'athlète entraîné en endurance est déplacé à 70-75% de $\dot{V}O_2$ max
- SV2 de l'athlète entraîné en endurance est déplacé à 80-90% de $\dot{V}O_2$ max

L'apparition retardée de ces seuils ventilatoires est un avantage permettant à l'athlète entraîné de tenir plus longtemps.

c) Entraînement et diffusion

La diffusion est un phénomène lié à la ventilation alvéolaire (VA).

A l'exercice maximal, la diffusion est améliorée par une ventilation optimale et un meilleur flux sanguin dans les régions pulmonaires supérieures, liée à un meilleur recrutement des capillaires pulmonaires après l'entraînement.

Cependant, à l'exercice sous-maximal, à cause du phénomène d'hypoventilation, la diffusion est affectée car la PaO_2 est diminuée. Ceci engendre une hypoxémie sous-maximale chez l'athlète entraîné en endurance.

Cette hypoventilation et hypoxémie sous-maximale sont les conséquences directes de l'entraînement en endurance. Chez certains athlètes cette hypoxémie disparaît lorsque l'intensité augmente, tandis que chez d'autres cette hypoxémie s'intensifie jusqu'à l'exercice maximal. Ce phénomène est appelé Hypoxémie Induite par l'Exercice (HIE).

d) L'Hypoxémie Induite par l'Exercice

Les athlètes spécialisés dans les sports d'endurance repoussent leurs limites cardiaque et musculaire mais atteignent les limites de la fonction pulmonaire et développent une HIE. Ce phénomène reproductible mais non systématique est observé chez un athlète sur trois entraîné en endurance.

Il se caractérise par une chute de la PaO_2 , une chute de la SaO_2 , une augmentation de la $PaCO_2$ et une augmentation accrue de la $D(A-a)O_2$. Ceci reflète une hypoxémie associée à une désaturation et un trouble des échanges gazeux.

Deux méthodes d'exploration de la HIE existent : la mesure de la désaturation par oxymétrie et la mesure des gaz du sang artériel.

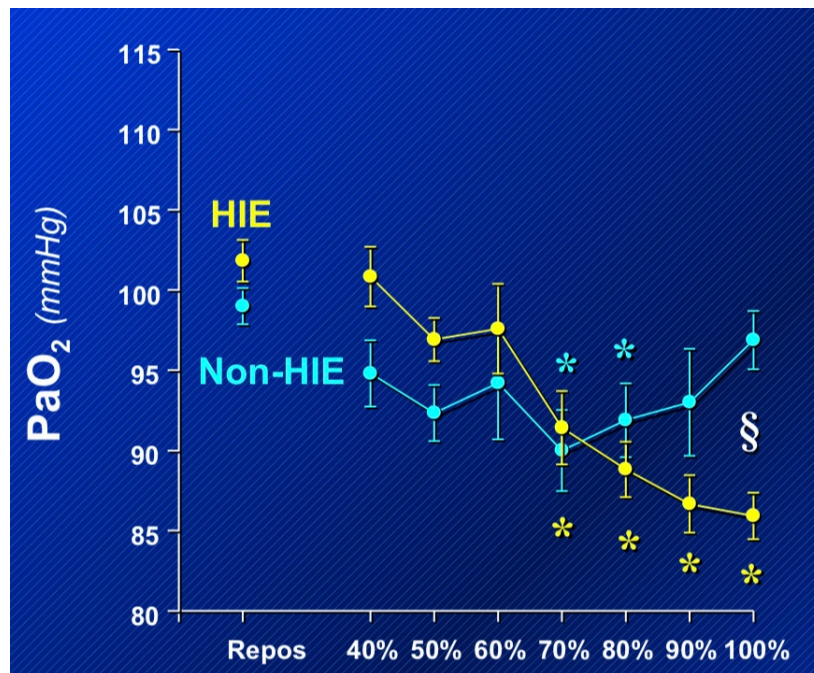


Figure 24 : Evolution de la PaO₂ en fonction de l'exercice

On observe deux phases de l'HIE :

La phase précoce qui débute lors d'exercices modérés entre 30 et 60% de la VO₂ max est présente chez tous les athlètes.

On observe à ce moment une diminution de la PaO₂ et une augmentation de la PaCO₂ tandis que la D(A-a)O₂ est normale. En effet, tous les athlètes de haut niveau présentent une diminution de la PaO₂ à l'exercice sous maximal associée à une hypercapnie. Celles-ci disparaissent chez certains à l'exercice maximal, ou persistent et s'accroissent.

L'hypoventilation alvéolaire à l'exercice modéré est une adaptation générale à l'entraînement pour diminuer la production de lactates, diminuer l'utilisation de glucides avant l'entraînement mais aussi diminuer la sensibilité des centres respiratoires au CO₂ à l'exercice.

La phase tardive débute lors d'exercices plus intenses entre 70 et 100% de VO₂ max.

Chez les sujets présentant une HIE, on observe une chute de la PaO₂ avec cette fois-ci une augmentation de la D(A-a)O₂ ce qui prouve que la ventilation est inadéquate.

2. Maillon cardiovasculaire



a) *Conséquences morphologiques de l’entraînement*

Le fameux « cœur d’athlète » est caractérisé par une hypertrophie significative du ventricule gauche et une hypertrophie moindre du ventricule droit.

Un changement morphologique entraînant un changement fonctionnel, nous pouvons affirmer que l’augmentation du volume cardiaque est donc une évidence, et ce d’autant plus que les sujets sont entraînés en endurance.

Cette hypertrophie est excentrique avec dilatation des ventricules et est accompagnée d’une augmentation de la densité des capillaires du myocarde qui permet une meilleure vascularisation.

A court terme, une dilatation des artérioles et capillaires est provoqué afin d’irriguer les muscles en oxygène. Pour assurer cette distribution du sang vers les muscles, les vaisseaux des organes au repos se contractent et leur débit peut diminuer de moitié.

A long terme, les muscles s’enrichissent en capillaires, à la fois car les muscles se développent mais également parce que de nombreux capillaires jusque-là inutilisés sont mobilisés pour améliorer les capacités d’irrigation sanguine. Les artérioles peuvent également se développer et se ramifier.

b) *Impact sur les paramètres de la fonction cardiaque*

Les conséquences d’un plus grand volume cardiaque sont une plus grande capacité de remplissage et moins de nécessité d’actionner la pompe.

Le cœur se remplit plus, les parois s’étirent plus, et en réponse à la loi de Starling,(15) le cœur se contracte plus fort et envoie une plus grande quantité de sang à chaque contraction : le VES est augmenté, au repos, à l’exercice sous maximal, et à l’exercice maximal.

Par rapport aux valeurs mesurées avant l'entraînement, la fréquence cardiaque au repos et à l'exercice sous-maximal diminue. Tandis qu'à l'exercice maximal, elle serait seulement légèrement diminuée. Ceci permet au cœur de se remplir davantage entre deux contractions.

Au repos et à l'exercice sous maximal, le débit cardiaque, résultante du VES et de la Fc n'est pas modifié par rapport aux sujets non entraînés. C'est à l'exercice maximal que la différence est importante et les athlètes très entraînés en endurance peuvent atteindre des valeurs extrêmes de débit cardiaque de l'ordre de 40L/min contre 20 à 25L/min chez un sujet non entraîné. Les muscles peuvent donc être alimentés rapidement en oxygène, ce qui est un argument de choc pour une performance d'endurance.

c) Modification du volume sanguin et conséquences

L'entraînement en endurance va avoir la capacité de mettre en place des adaptations pour éviter les pertes d'eau mais également éviter l'épaississement du sang, propice aux résistances vasculaires et gêne au fonctionnement optimal de la pompe cardiaque.

Deux hormones spécifiques impliquées dans le maintien de l'équilibre hydro-électrolytique vont permettre ces adaptations. Il s'agit de la vasopressine qui est une hormone anti-diurétique et l'aldostérone. Leur rôle est d'éviter l'arrivée précoce d'une déshydratation, entraînant une diminution de la performance.

La vasopressine est une hormone sécrétée par l'hypothalamus qui régule l'équilibre hydrique grâce à la présence d'osmo-récepteurs situés dans l'hypophyse. Ceux-ci sont activés par l'augmentation de la concentration en ions Na^+ , due à une diminution du volume plasmatique. Le rôle majeur de cette hormone est donc de restaurer le volume plasmatique en limitant les pertes d'eau liées à la pratique d'une activité d'endurance comme la sudation. Sa réponse dépend des modalités d'exercice et des conditions environnementales.

L'aldostérone est le principal facteur de la régulation rénale de Na^+ . Il est produit par les glandes surrénales lors de l'activation du système rénine-angiotensine consécutif à une stimulation du système nerveux sympathique, une diminution de l'osmolalité du filtrat urinaire ou une diminution de pression artérielle.

Du fait de ces adaptations, les athlètes entraînés en endurance ont un volume plasmatique et donc un volume sanguin plus élevé que les sujets non entraînés.

L'augmentation du volume plasmatique associé à une faible augmentation du nombre de globules rouges fait que le sang est plus fluide et donc offre moins de résistance à l'écoulement. Le retour veineux est grandement facilité ce qui ramène plus rapidement le sang pauvre en oxygène aux poumons afin de le régénérer.

L'adaptation cardio-vasculaire qui découle d'un entraînement en endurance est très important car la fonction cardiaque peut être une limite de taille.

3. Maillon musculaire

a) *D'un point de vue quantitatif et qualitatif*

Lors de l'entraînement en endurance, une hypertrophie existe et dépend de la surcharge appliquée au système musculaire. Cette hypertrophie est sélective et les fibres de type I vont voir leur diamètre croître par rapport aux fibres de types II.

Cette hypertrophie passe par l'activation de mécanismes cellulaires génétiques consécutive à l'augmentation des besoins en ATP et de sa resynthèse. Cela induit une augmentation de l'acide ribonucléique messenger (ARNm) et donc une activation de la synthèse protéique.

Les réponses musculaires d'un entraînement en endurance vont surtout intéresser l'aspect qualitatif du muscle.

Pour les fibres de types I, c'est la surface de section qui augmente, donc la capacité aérobie.

En revanche, pour les fibres de types II, on observe un shift des fibres IIb vers les fibres IIa, amenant les fibres sollicitées vers une typologie à dominante oxydative.

Le paramètre qui change avec certitude est la vascularisation du muscle dès les premières semaines d'entraînement. Ces adaptations vasculaires permettent d'améliorer la surface d'échange pour l'O₂ mais aussi d'augmenter les apports en nutriments, le drainage des déchets métaboliques et le transfert de chaleur. Des augmentations allant de 5 à 15% sont observées. Mais elles restent inférieures aux niveaux d'adaptations enzymatiques et mitochondriaux tel que les enzymes clés du cycle de Krebs. Celles-ci vont être particulièrement augmentées, comme la SDH (succinate déshydrogénase) qui augmenterait de 150% lors de 90 minutes d'exercice quotidien en endurance.

Les adaptations enzymatiques sont énormes et ne cessent d'augmenter, contrairement aux adaptations vasculaires et typologiques qui semblent être limitées au bout de quelques mois. On observe une capacité « boostée » par l'entraînement en endurance pour les enzymes impliquées dans la chaîne respiratoire telle que la cytochrome oxydase. Les mitochondries, structures d'accueil des complexes enzymatiques, sont elles aussi augmentées, en nombre et en taille, appuyant un peu plus la tendance oxydative du muscle.

b) *D'un point de vue métabolique*

Les modifications de structure vont engendrer des modifications de fonction. Le muscle va se diriger vers un métabolisme prioritairement oxydatif, aérobie et utilisant de façon privilégiée les glucides et les lipides.

Le muscle d'un athlète entraîné en endurance a plus de facilité à oxyder les hydrates de carbone que le muscle d'un sujet non entraîné. Le gain en potentiel oxydatif alimente d'avantage le cycle de Krebs en acide pyruvique. De plus, la capacité de stockage du glucose dans le muscle sous forme de glycogène est ainsi boostée.

Ceci passe par l'augmentation de la glycogène synthase et l'augmentation des récepteurs Glut-4 responsables de l'entrée du glucose dans les cellules musculaires, sous l'influence de l'insuline. Mais attention, le muscle a ses limites. Lors d'efforts sous maximaux, le muscle puise davantage dans les réserves en lipides. Ceci s'explique par une modification morphologique des athlètes d'endurance qui entraîne une augmentation des concentrations intramusculaires de triglycérides, sous forme de gouttelettes à proximité des mitochondries.

VI. L'adaptation nutritionnelle du sportif de l'extrême

A. L'équilibre alimentaire

« Vous pouvez avoir la meilleure technique du monde, elle ne vous sera guère utile si vous n'alimentez pas bien votre corps ! » -Steve House, alpiniste.

Le trail étant une discipline très énergivore, elle nécessite une préparation physique, psychique mais surtout alimentaire adaptée afin d'optimiser les performances de l'athlète.

Le sportif est considéré comme une machine de précision, il suffit qu'un seul rouage soit grippé et toute la machine est dérégulée.

Fini les « pasta party » si populaires chez les sportifs !! L'équilibre alimentaire du sportif d'endurance est très important et permet d'apporter tous les nutriments dont il aura besoin pour optimiser ses performances. Il est fondé sur le principe qu'on recommande classiquement une ration dans laquelle les glucides délivrent 55 à 60% d'énergie, les lipides 25 à 30% et les protides le reste. (16) La pyramide alimentaire d'inspiration crétoise illustre bien cet équilibre. Cet équilibre alimentaire repose sur un équilibre des différentes catégories d'aliments tel que la viande, les légumes, les fruits, les féculents, les graisses, mais aussi sur un équilibre et une variété des aliments au sein d'une même catégorie.



Figure 25 : Pyramide alimentaire d'inspiration crétoise

La pyramide permet d'équilibrer les apports en nutriments mais également de respecter le métabolisme de manière simple.

Dans cette pyramide les recommandations sont exprimées en portion afin de pouvoir adapter les quantités en fonction des activités quotidiennes.

Une bonne alimentation permet également de mieux supporter les séances d'entraînement afin de s'améliorer, d'éviter le risque de blessures et aussi de mieux récupérer après les séances d'entraînements et les compétitions.

B. Orientation dans le choix des nutriments

Comme nous l'avons vu précédemment, la réponse adaptative à l'entraînement physique est déterminée par une combinaison de plusieurs facteurs comme la durée de l'exercice, son intensité mais aussi le type d'exercice et la fréquence de l'entraînement. Dans cette partie nous allons voir que la qualité et la quantité de la nutrition peuvent amplifier ou atténuer ces adaptations. Il est important de comprendre les interactions entre nutrition et exercice pour optimiser les adaptations spécifiques, augmenter le rendement musculaire et la performance de l'athlète. (17)

Les nutriments désignent l'ensemble des substances contenues dans un aliment pouvant être entièrement et directement assimilées. Les macronutriments correspondent à l'ensemble des nutriments dont la dégradation peut fournir de l'énergie sous forme d'ATP. Il s'agit des glucides, des lipides et des protéines.

1. Les glucides

Les glucides sont des sucres et des produits qui en dérivent dont les maltodextrines. Il existe plusieurs sortes de glucides que l'on différencie selon leur structure chimique. On distingue tout d'abord les sucres dits « simples » : il s'agit de mono- ou disaccharides constitués d'une ou deux molécules de sucre. Les plus connus sont par exemple le glucose, le fructose et le galactose pour les monosaccharides et le lactose, le saccharose, le sucrose et le maltose pour les disaccharides.

Le saccharose (sucre de table) est composé d'une molécule de fructose et d'une molécule de glucose tandis que le lactose (sucre du lait) est composé d'une molécule de galactose et d'une molécule de glucose.

Leur structure chimique simple ne nécessite pas d'action enzymatique (pour les monosaccharides) ou nécessite une unique action très rapide pour être absorbée (pour les disaccharides).

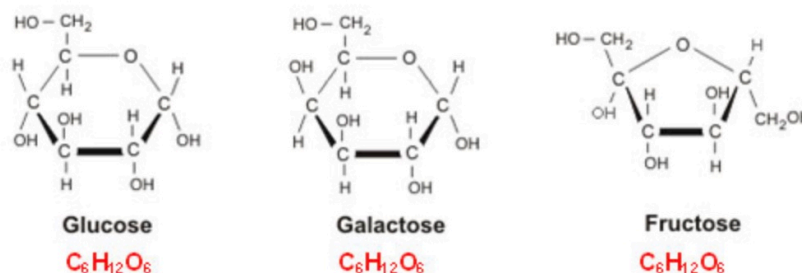


Figure 26 : Structure chimique du Glucose, du Galactose et du Fructose (monosaccharides)

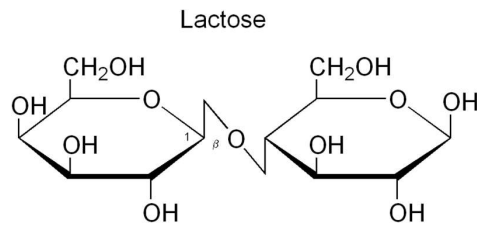


Figure 27 : Structure chimique du Lactose (disaccharide)

Les glucides complexes représentés par la famille des amidons sont de longs polymères de glucides constitués d'associations de sucres simples. Ces grosses molécules ne peuvent être utilisées par l'organisme qu'après avoir été découpées en petites unités simples au préalable. Elles sont par conséquent absorbées plus lentement que les sucres simples.

L'amidon est constitué de milliers d'unités de glucose rattachées les unes aux autres et sa digestion libère lentement les molécules de glucose, d'où le nom de « sucres lents ».

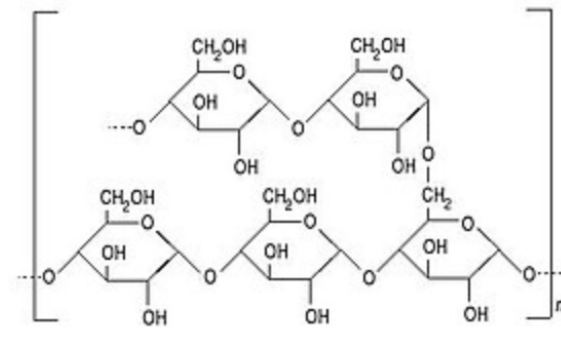


Figure 28 : structure chimique de l'amidon

Les glucides sont soumis au contrôle de deux hormones : l'insuline et le glucagon. L'insuline va conduire au stockage des glucides tandis que le glucagon, à l'inverse, induit leur dégradation.

En pratique, chez l'athlète en entraînement, les glucides qui entrent dans son alimentation quotidienne sont majoritairement des glucides complexes composés d'amidon. Les aliments de la famille des amylacées en sont riches : céréales, tubercules, légumineuses, fruits. Petit conseil à ce sujet : les légumineuses devraient être trempées dans l'eau pendant 8 à 10h avant d'être cuites, ce qui permet d'activer leur germination et de faciliter leur digestion. Ceci s'explique par la réduction des protéines en acides aminés et par l'activation des phytases qui permet la destruction de l'acide phytique (molécule piégeant de nombreux ions tel que le fer, le magnésium, le potassium).

L'index glycémique (IG) :

On le sait, toutes les sources glucidiques ne se valent pas. Un paramètre particulier, qui est l'index glycémique, permet d'apprécier la charge en glucides d'un aliment en se basant sur les effets métaboliques qui résultent de son ingestion. Ce paramètre quantifie la capacité qu'a un aliment à élever la glycémie après un repas. Cette élévation de la glycémie va stimuler la sécrétion d'insuline. Or l'insuline intervient sur trois métabolismes :

- Celui des sucres, permettant aux cellules d'absorber les glucides afin de pouvoir les transformer en énergie, mais aussi afin de pouvoir les stocker sous forme de glycogène.
- Celui des lipides, en favorisant la production des lipides à partir des glucides excédentaires, leur stockage sous forme de masse grasse et en freinant leur dégradation pour fournir de l'énergie.
- Celui des protéines, en favorisant la synthèse protéique et en inhibant la destruction des protéines.

C'est un paramètre sans unité, qui est compris entre 0 et 100. La communauté scientifique a défini que la molécule qui sert de comparateur est le glucose pur, affecté d'un index glycémique de 100.(18)(19)

Pour obtenir l'index glycémique d'un aliment, les scientifiques effectuent le rapport :

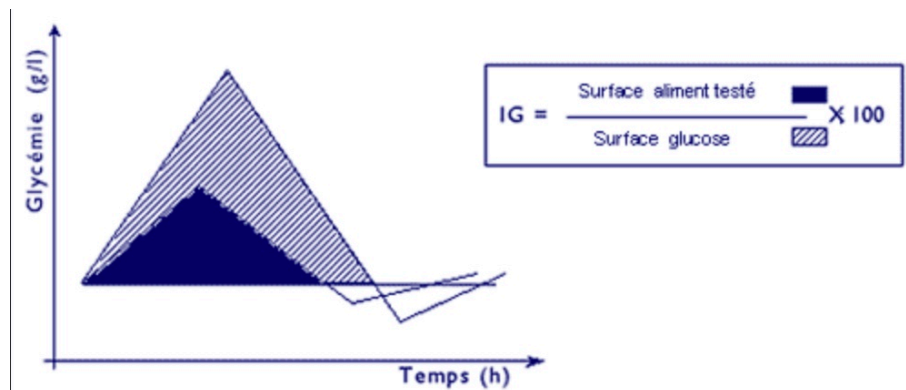


Figure 29 : Détermination de l'index glycémique

Des études axées sur la consommation d'un repas pré-exercice ont fourni la preuve qu'il existe un avantage en terme de performances d'endurance lorsque l'athlète ingère un repas à IG faible plutôt qu'un repas à IG élevé.(19)

Voici une liste exhaustive de l'index glycémique de quelques aliments :

Indices glycémiques des aliments

Indices glycémiques faibles (< 39)		Indices glycémiques moyens (40 à 59)		Indices glycémiques élevés (>60)	
Abricots (fruit frais)	30	Abricot (boîte, au sirop)	55	Ananas (boîte)	65
Abricots sec	35	Airelle rouge, canneberge	45	Baguette	70
Ail	30	Ananas (fruit frais)	45	Bananes (mûre)	60
Fruits oléagineux: amandes, cacahuètes, arachides, noisettes, noix, noix de cajou, pistaches	15	Avoine	40	Barres chocolatées (sucrées)	70
Fruits rouges frais sans sucre: airelle, myrtille, fraise, framboise, groseille, mûre	25	Banane (verte)	45	Betterave (cuite)	65
Artichaut	20	Banane plantain (cru)	45	Bière	110
Asperge	15	Barre énergétique de céréale (sans sucre)	50	Biscottes	70
Aubergine	20	Beurre de cacahuète (sans sucre ajouté)	40	Biscuit	70
Avocat	10	Biscuits (farine complète; sans sucre)	50	Bouillie de farine	70
Betterave (cru)	30	Biscuits sablés (farine, beurre, sucre)	55	Brioche	70
Brocoli	15	Blé (farine intégrale)	45	Carottes (cuites)	85
Nectarines (blancs ou jaunes; fruit frais)	35	Blé (type Ebyl)	45	Céleri rave (cuit)	85
Cacao en poudre (sans sucre)	20	Boulgour, bulgur (blé, cuit)	55	Céréales raffinées sucrées	70
Carottes (cru)	30	Céréales complètes (sans sucre)	45	Châtaigne, marron	60
Cassoulet	35	Chayotte, christophine (purée de)	50	Chips	70
Céleri branches	15	Cidre brut	40	Confiture et marmelade (sucrée)	65
Céleri rave (cru, râmolade)	35	Couscous intégral, semoule intégrale	45	Corn Flakes, flocons de maïs	85
Céréales germées (germes de blé, de soja...)	15	Couscous/semoule complète	50	Courges (diverses)	75
Cerises	25	Epeautre (farine intégrale ancienne)	45	Crème glacée classique (sucrée)	60
Champignon	15	Epeautre (pain intégral)	45	Croissant	70
Chocolat noir (>70% de cacao)	25	Farine de kamut (intégrale)	45	Dattes	70
Chocolat noir (>85% de cacao)	20	Farine de quinoa	40	Doughnuts	75
Choux, choucroute, chou-fleur, chou de bruxelle	15	Fèves (cru)	40	Farine complète	60
Cœur de palmier	20	Figues sèches	40	Farine de blé blanche	85
Concombre	15	Flocons d'avoine (non cuite)	40	Farine de maïs	70
Confiture ou marmelade (sans sucre)	30	Gelée de coing (sans sucre)	40	Farine de riz	95
Cornichon	15	Haricots rouges (boîte)	40	Fécule de pomme de terre (amidon)	95
Courgettes	15	Jus d'ananas (sans sucre)	50	Fève (cuites)	80
Crustacés (homard, crabe, langouste)	5	Jus d'orange (sans sucre et pressé)	45	Gaufre au sucre	75
Echalote	15	Jus d'airelle rouge/ canneberge (sans sucre)	50	Gelée de coing (sucrée)	65
Endives	15	Jus de carottes (sans sucre)	40	Glucose	100
Epices (poivre, persil, basilic, origan, carvi, cannelle, ...)	5	Jus de mangue (sans sucre)	55	Gnocchi	70
Epinards	15	Jus de pomme (sans sucre)	50	Lasagnes	75
Figue, figue de barbarie (fraîche)	35	Jus de raisin (sans sucre)	55	Maizena (amidon de maïs)	85
Flageolets	25	Kaki	50	Mayonnaise (industrielle, sucrée)	60
Fromage blanc sans sucre	30	Ketchup	55	Melon	60
Fructose	20	Kiwi	50	Miel	60

Tableau 2 : Index glycémiques des aliments



Stockage des glucides :

Dans la mesure où les apports alimentaires sont discontinus sur une journée, le stockage des glucides est fondamental puisqu'il représente plus de la moitié de l'apport énergétique quotidien.

Pour un athlète, la gestion de l'énergie tout au long de la course est primordiale. Le paramètre le plus important est le maintien d'un niveau de glycogène musculaire et hépatique suffisant car l'épuisement du glycogène limitera la capacité de travail maximal à l'effort.

Une fois ingéré, le glucose alimentaire est absorbé au niveau intestinal et passe dans la circulation sanguine. Celui-ci est stocké essentiellement au niveau des muscles squelettiques et du foie par la réaction de glycogénogénèse. Lorsque le glucose est trop abondant, les capacités de réserve du foie étant saturées, le foie transforme le surplus de glucose en lipides stockés au niveau des cellules hépatiques mais aussi adipeuses.

Lors d'un exercice intense, les besoins en glucose augmentent. Le glycogène hépatique va être transformé en glucose via la réaction de glycogénolyse en début d'exercice, puis lorsque les réserves en glycogène seront épuisées le glucose sera formé via la réaction de néoglucogénèse à partir de l'alanine, des lactates et du glycérol.(20)

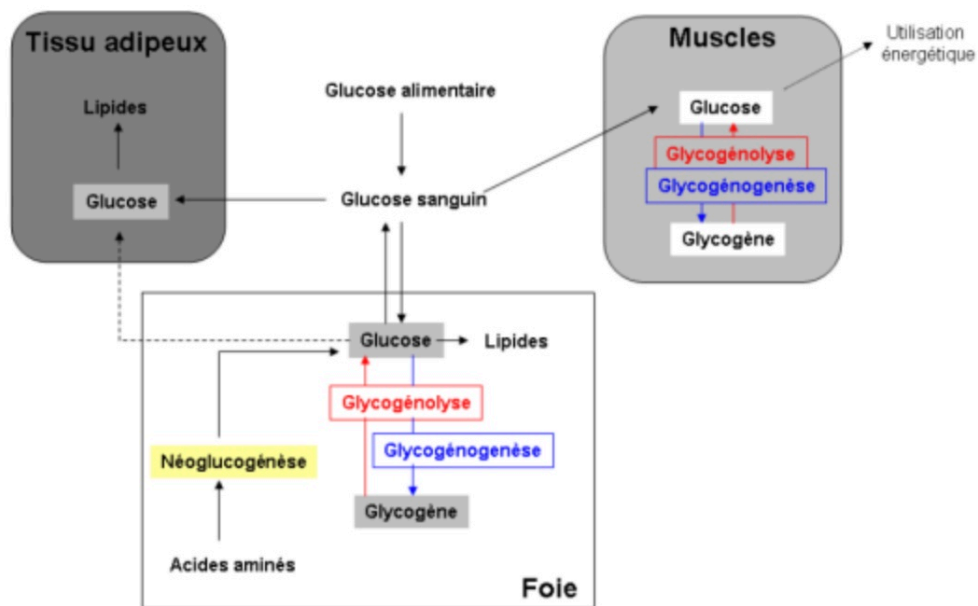


Figure 30 : Les rôles privilégiés du foie, du tissu adipeux et musculaire dans l'homéostat glycémique

Le glycogène qui résulte de la glycogénogenèse possède une structure proche de celle de l'amidon. Les deux réservoirs de glycogène sont utilisés à des fins différentes, celui stocké dans le foie permet d'assurer le maintien de la glycémie entre deux repas consécutifs ainsi que l'apport de glucose au cerveau, tandis que le glycogène musculaire n'est destiné qu'au muscle où il est stocké. Ainsi, un coureur ayant épuisé son glycogène des membres inférieurs ne tirera aucun profit du glycogène stocké dans ses membres supérieurs. Pour reconstituer des réserves en glycogène optimales, il faut ingérer **6 à 10 grammes de glucides par kilo et par jour.**(21)

Par ailleurs, ces glucides ne doivent pas être apportés n'importe comment. Des études ont mis en évidence une avidité extrême et transitoire des muscles vis-à-vis des glucides, et ceci dans les quelques heures qui suivent un effort. La vascularisation des muscles et l'activité de la glycogène synthase sont renforcées à cet instant, et la prise concomitante de glucide entraîne une libération d'insuline qui augmente la durée de vie des récepteurs du glucose à la surface des fibres musculaires appelés GLUT-4.

La prise de glucides doit être accompagnée d'eau pour optimiser les réserves en glycogène. 1 gramme de glycogène est stocké avec environ 3 grammes d'eau.

Il en résulte une mise en réserve forte et rapide du glucose sous forme de glycogène.

Passées ces quelques heures, le muscle retrouve une avidité normale. Ce phénomène appelé « fenêtre métabolique », est essentiel dans la vie alimentaire d'un sportif.

Le coureur a un intérêt de posséder des stocks en glycogène élevé car ce sont ces stocks qui déterminent la durée pendant laquelle il peut maintenir une cadence élevée pendant sa course.

Les facteurs qui orientent positivement les stocks en glycogène sont :

- L'état initial des stocks en sachant qu'une fibre musculaire « vide » en glycogène va pomper plus de sucres, ceci est le phénomène de surcompensation que nous reverrons plus tard.
- Le niveau d'entraînement, puisque plus le sportif est entraîné, plus la capacité à stocker le glycogène va être meilleure et meilleure sera la sensibilité à l'insuline.

Rôle annexe des glucides :

Les glucides ont un rôle énergétique fondamental certes, mais d'autres propriétés leur sont associées. Une ingestion de glucides vient perturber la glycémie, et différentes hormones sont chargées de la rééquilibrer tel que l'insuline, le glucagon, le cortisol, la noradrénaline et l'adrénaline.

Le cortisol est une hormone glucocorticoïde sécrétée naturellement par la glande surrénale en réponse à un état de stress physiologique ou psychologique, ce que l'on retrouve au cours de la pratique d'un sport. Il permet de stimuler la néoglucogénèse hépatique afin de re-synthétiser du glucose.

Une absence de prise de glucides à l'effort majore ce processus alors qu'un apport régulier en glucides au cours de l'effort le minimise.

Par ailleurs, les glucides jouent un rôle important dans la protection anti-radicalaire. La neutralisation des entités radicalaires formées au niveau des membranes cellulaires fait appel à une série successive de molécules qui modifient leur degré d'oxydation en acceptant un électron jusqu'à ce que cet électron interagisse avec une molécule qui deviendrait plus stable chimiquement : il s'agit du NADPH. Celui-ci sous l'effet des radicaux libres se transforme en NADP, recyclé en NADPH par la voie des pentoses phosphates. Si la disponibilité de glucose chute, ce cycle se trouve considérablement ralenti et la prise en charge des formes radicalaires est moins efficace, d'où une agression accrue.

Les glucides fermentescibles :

Certaines molécules qui appartiennent à la famille des glucides, ne peuvent être digérées par nos enzymes intestinales. Par contre, certaines sont fermentescibles, c'est-à-dire que les bactéries présentes dans notre intestin peuvent les utiliser pour en tirer de l'énergie et ainsi assurer leurs nombreux rôles (protection, stimulation du système immunitaire, apport de micronutriments...) Leur rôle dans le bon fonctionnement du système intestinal est primordial.

Ces glucides, d'un point de vue nutritionnel, se rangent dans la famille des fibres et dans le sous-groupe des « prébiotiques ». (16)

Certaines fibres sont solubles dans l'eau et retardent ou diminuent l'absorption des autres glucides et des lipides. En nutrition du sport, cette propriété est intéressante pour éviter les pics glycémiques et les effets rebonds suite à une ingestion importante de sucres rapides, notamment avant un effort.

En revanche, sous l'effet de la fermentation bactérienne colique, les fibres libèrent différents gaz tels que le dioxyde de carbone, le méthane, qui donnent des flatulences et peuvent être source d'inconfort digestif en cas de forte consommation. C'est pourquoi on déconseille au sportifs l'ingestion de plats riches en fibres dans les 48 heures précédant un effort.

Les maltodextrines :

Ce sont un groupe d'entités glucidiques différentes (oligosaccharides, maltose, glucose) issus de l'hydrolyse plus ou moins partielle de l'amidon.

Pour se renseigner sur le degré d'hydrolyse, un indice est donné, il s'agit du Dextrose Équivalent (DE) qui évolue entre 0 et 100. Plus celui-ci est élevé, plus l'hydrolyse de l'amidon est élevée, plus les chaînes sont courtes et plus l'index glycémique sera élevé. Les maltodextrines ont un dextrose équivalent compris entre 0 et 20, il y a donc une multitude de combinaisons.

L'intérêt des maltodextrines est d'être bien toléré par l'organisme, d'avoir un goût neutre, peu sucrant et se dissolvant facilement. C'est pour cela qu'on les retrouve très souvent dans la composition des boissons avant/pendant/et après effort.

2. Les lipides

Les lipides constituent une grande famille de macronutriments dans laquelle on retrouve les triglycérides, les phosphoglycérides, les stéroïdes, les acides gras et les vitamines liposolubles (vitamines A, D, E et K). Ils proviennent de plusieurs sources : une partie des lipides est apportée par l'alimentation et une autre partie est fabriqué par l'organisme notamment à partir de glucides excédentaires.

Pour que l'organisme fonctionne bien et surtout chez un athlète d'endurance, il est essentiel d'avoir un bon équilibre entre tous les types d'acide gras. Les proportions recommandées sont 25% d'acides gras saturés, 60% d'acides gras monoinsaturés et 15% d'acides gras polyinsaturés. Et parmi les derniers, le rapport oméga-6/oméga-3 recommandé doit être de 3/1 à 4/1.

Leurs principaux rôles sont l'apport d'énergie, la thermorégulation, la mise en réserve métabolique et ils agissent comme un isolant thermique.

Un individu sain de morphologie normale possède 12 à 25% de lipides sur la masse corporelle totale. Et dans cette part de lipides, les triglycérides représentent 75%.

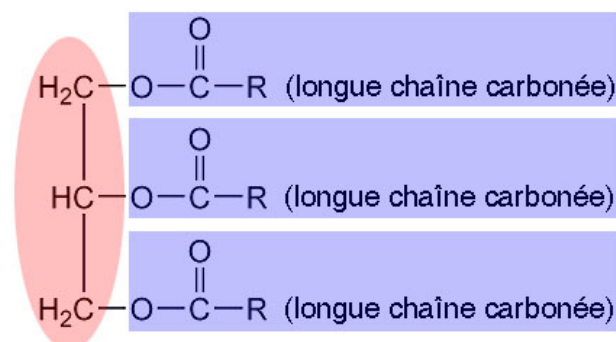


Figure 31: Représentation simplifiée d'un triglycéride où R représente la molécule de chaque acide gras.

Les triglycérides sont composés d'acides gras qui peuvent être de trois types :

- Les acides gras saturés : très présents dans la viande rouge, la charcuterie, les produits laitiers non écrémés (lait entier, beurre, fromage), les œufs... Ces acides gras ne présentent structurellement aucune liaison multiple liant deux atomes de carbone. Ils représentent 25% de la part totale de lipides.
Consommé en excès, ils augmentent le risque de pathologies cardiovasculaires, donc on se doit de limiter leur consommation mais pas non plus de l'exclure.
- Les acides gras mono-insaturés : il s'agit des oméga-9. On les retrouve dans l'huile d'olive, l'huile d'arachide, les noix, les avocats... Ils ne présentent qu'une seule liaison multiple entre deux carbones au sein de la molécule. Ils représentent 60% de la part totale des lipides. Ils apportent de l'énergie au corps, ont un rôle hypocholestérolémiant, et empêchent la formation de plaques d'athérome.
- Les acides gras polyinsaturés : il s'agit des oméga-3 et -6 (que l'on détaillera plus tard) retrouvés dans les huiles de colza, de tournesol, de soja, et dans les poissons gras tel que le saumon, le thon, le maquereau... Ils présentent plusieurs liaisons multiples unissant deux carbones au sein de la molécule. Celles-ci contribuent à l'entretien des articulations et au bon fonctionnement du système immunitaire. Ils représentent 15% de la part totale des lipides.

Les acides gras sont les éléments structuraux des phospholipides membranaires et, à ce titre contribuent au bon déroulement des processus hormonaux, nerveux et immunitaire.

En revanche l'organisme ne sait pas synthétiser quelques acides gras, l'homme est donc tributaire de leur apport par son alimentation. Il s'agit des acides gras essentiels dont les plus importants sont l'acide linoléique (chef de file des oméga-6) et alpha-linolénique (chef de file des oméga-3). Ils possèdent de nombreuses propriétés cardioprotectrices comme l'augmentation du bon cholestérol HDL, et une diminution du cholestérol total. L'ensemble des triglycérides se retrouve stocké dans l'organisme grâce aux adipocytes et sont disséminés en plusieurs endroits du corps, notamment dans les interstices situés entre les faisceaux de fibres musculaires où ils forment une sorte de « gouttelette lipidique ». Lors d'un effort de longue durée, ces fibres feront appel prioritairement à ces réserves et simultanément elles puiseront dans le sang les acides gras libérés de cellules adipeuses viscérales.

Les compléments lipolytiques à visée ergogénique :

Les athlètes ont cherché des moyens d'accroître leur capacité d'endurance en augmentant l'utilisation de lipides pendant l'exercice. Il existe un certain nombre de suppléments qui atténuent les effets de la réduction du poids corporel ou de l'accumulation de graisse qui peuvent être obtenus par une stimulation de la lipolyse.(22)

La L-carnitine :

Bien connu des sportifs d'endurance, la L-carnitine, comme nous l'avons vu précédemment lors du catabolisme des acides gras, a un rôle lipolytique important. Elle permet le transport des acides gras comptant entre 12 et 18 atomes de carbone dans la mitochondrie afin de produire de l'énergie. Cette molécule est normalement présente dans le plasma sous forme de carnitine libre chez l'homme adulte en bonne santé. On la retrouve principalement dans les produits d'origine animale (en particulier la viande rouge) et les produits laitiers. Cette molécule est synthétisée par l'organisme à partir de deux acides aminés qui sont la méthionine et la lysine. La carnitine synthétique se présente sous la forme d'isomères D et L, cependant, seule la L-carnitine est physiologiquement active. (23) Il faut faire attention aux compléments alimentaires utilisés car la D-carnitine inhibe l'effet de la L-carnitine. (24)

Depuis 1980, plusieurs études, humaines et animales, ont tenté de déterminer le mécanisme par lequel la L-carnitine augmente la performance physique. Bien que certaines montrent son potentiel pour améliorer les performances d'endurance associées à une augmentation de l'oxydation des graisses, les données ne sont pas encore démontrées en pratique, en particulier pour les athlètes. (22)

On ne peut donc malheureusement pas conclure de l'efficacité de la supplémentation en L-carnitine pour l'amélioration des performances durant l'effort, ni pendant la récupération.

Les MTC (Medium Chain Triglycérides) :

Ces molécules comprennent des acides gras ne possédant pas plus de 12 atomes de carbone, à l'inverse de la plupart des acides gras alimentaires et corporels qui en renferment 16 et plus. Leur but est de court-circuiter le système enzymatique de la carnitine-acyltransférase car ils pénètrent dans la mitochondrie par diffusion passive.(25)

Ils sont rapidement métabolisés, surtout si on les associe à des glucides. L'idée est donc venue à certains auteurs de tester l'hypothèse suivante : est-ce qu'en administrant des MCT à des athlètes en cours d'activité on augmenterait la combustion des lipides ? Dans ce cas on verrait, à intensité égale, la quantité de glycogène utilisé chuter qui se traduirait par une amélioration des performances physiques. Mais les premières études examinant cette hypothèse sont contrastées : les résultats d'optimisation des performances sont négatifs pour un apport de 30g avant l'effort alors que pour un apport de 45g, l'oxydation des glucides diminue. (26) (27)

Une étude plus récente montre que lors de l'ingestion de 86g de MCT consommés en même temps que de petites quantités de glucides lors d'une session de deux heures de vélo à 60% de VO₂ max, le glycogène est moins utilisé. (28) En revanche l'ingestion de telles quantités de lipides s'accompagne de symptômes digestifs fort désagréables. En conclusion, la piste des MCT, comme celle de la L-carnitine, ne constitue pas un moyen efficace de retarder l'épuisement de glycogène au cours d'effort modérés et longs.

Rôle des lipides :

- Leur rôle principal est un rôle énergétique puisque lors de l'effort les muscles consomment des glucides, des protéines et des lipides. Ces derniers ont un très bon rendement énergétique qui est le double de celui des glucides. D'ailleurs l'organisme stocke beaucoup plus d'acides gras que de glucides. Cependant, les lipides ne peuvent fournir de l'énergie aussi rapidement que les glucides. Leur abondance et leur utilisation plus lente font des lipides la principale source d'énergie lors des sports d'intensité modérée et de longue durée. Les acides gras utilisés pour fournir de l'énergie proviennent des cellules musculaires et du tissu adipeux péri-viscéral et les plus faciles à utiliser sont les oméga-3.
- Ils ont aussi un rôle structurel puisqu'ils composent les membranes cellulaires. Effectivement, les membranes cellulaires sont composées d'acides gras sous forme de phospholipides, de cholestérol et de protéines aux fonctions multiples comme les enzymes, les récepteurs aux hormones et les transporteurs. Mais la nature des acides gras influence la qualité des membranes cellulaires. Si les acides gras saturés sont majoritaires, les membranes seront serrées et rigides car ils sont rectilignes. Si les acides gras polyinsaturés sont en grande quantité les membranes seront plus aérées, plus souples car ceux-ci sont angulés. Des membranes cellulaires souples auront plus de bénéfice pour les cellules. On retrouvera alors un meilleur fonctionnement des protéines membranaires comme le récepteur à l'insuline par exemple, une meilleure déformabilité ainsi qu'une meilleure résistance cellulaire utile pour les globules rouges qui ont besoin de se déformer pour passer dans certains petits vaisseaux.

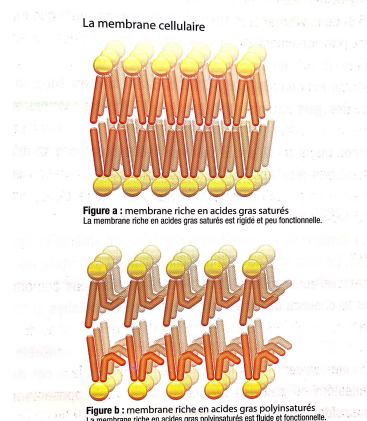


Figure 32 : composition de la membrane cellulaire

- Un rôle fonctionnel puisque les acides gras polyinsaturés sont les précurseurs des prostaglandines. Les oméga-6 sont précurseurs des prostaglandines pro-inflammatoire tandis que les oméga-3 sont eux précurseurs des prostaglandines anti-inflammatoires.
De plus, les oméga-3 favorisent la circulation sanguine de par son action vasodilatatrice contrairement aux oméga-6 qui ont une action vasoconstrictrice. Les oméga-3 peuvent également jouer sur le métabolisme des lipides puisqu'ils favorisent la lipolyse alors que les oméga-6 favorisent la lipogénèse. Le cholestérol est quant à lui précurseur des hormones stéroïdiennes, des sels biliaires et de la vitamine D.
- Pour finir les lipides ont un rôle dans la digestion puisque de nombreux éléments ne peuvent être absorbés sans matière grasse. Il s'agit des vitamines liposolubles tel que la vitamines A, D, E et K, et de certains anti-oxydants comme la curcumine, les flavonoïdes, les caroténoïdes.

Chez un athlète entraîné, pour une même intensité d'effort, plus celui-ci se prolonge, plus le mélange utilisé s'enrichit en lipides. On note que l'organisme se comporte comme un économiseur de son stock glycogénique.

3. Les protides

La famille des protides regroupe plusieurs membres qui sont les protéines, les peptides et les acides aminés. Les acides aminés sont les éléments les plus simples et constituent le matériau de base à partir duquel l'organisme fabrique les protéines. Les acides aminés ont une structure de base commune qui comprend un groupement azoté, un groupement carboxyle, un radical « méthyl », et une partie variable -R. C'est la variabilité de ce radical qui signe la spécificité de chacun.

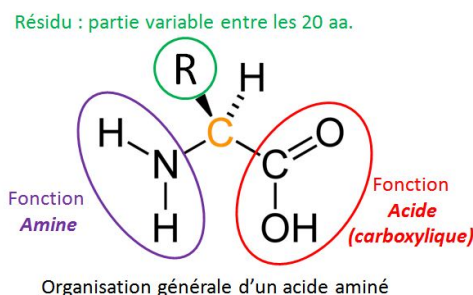


Figure 33 : Structure chimique d'un acide aminé

Les acides aminés que le corps utilise sont soit directement apportés par l'alimentation soit produits à partir d'autres acides aminés ingérés. Les besoins en acides aminés sont permanents et notre organisme ne dispose pas de réel stock.

Il existe vingt acides aminés divisés en deux groupes :

- Les acides aminés essentiels au nombre de huit, ne peuvent pas être élaborés par l'organisme. Ils doivent être impérativement apportés par l'alimentation. Ils sont indispensables à la vie et sont d'une importance réelle pour les sportifs car ils interviennent dans le fonctionnement du muscle.
- Les acides aminés dit « non essentiels » sont au nombre de douze et peuvent à la fois être fabriqués par notre organisme et apportés par l'alimentation.

Les 8 acides aminés essentiels (pour l'adulte)





	Leucine	Isoleucine	Valine	Thréonine	Méthionine	Phénylalanin	Tryptophane	Lysine
 Oeufs	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
 Volaille	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
 Viande rouge	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
 Poisson	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓
 Fromage	✓		✓	✓	✓	✓	✓	
 Soja	✓	✓	✓			✓		✓
 Céréales (blé, riz, maïs)		✓			✓		✓	✓
 Légumineuses (pois, haricots, lentilles)		✓	✓		✓	✓		✓
 Fruits à coque (amande, cacahuètes, noix)		✓				✓	✓	
 Quinoa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 3 : Liste des acides aminés essentiels

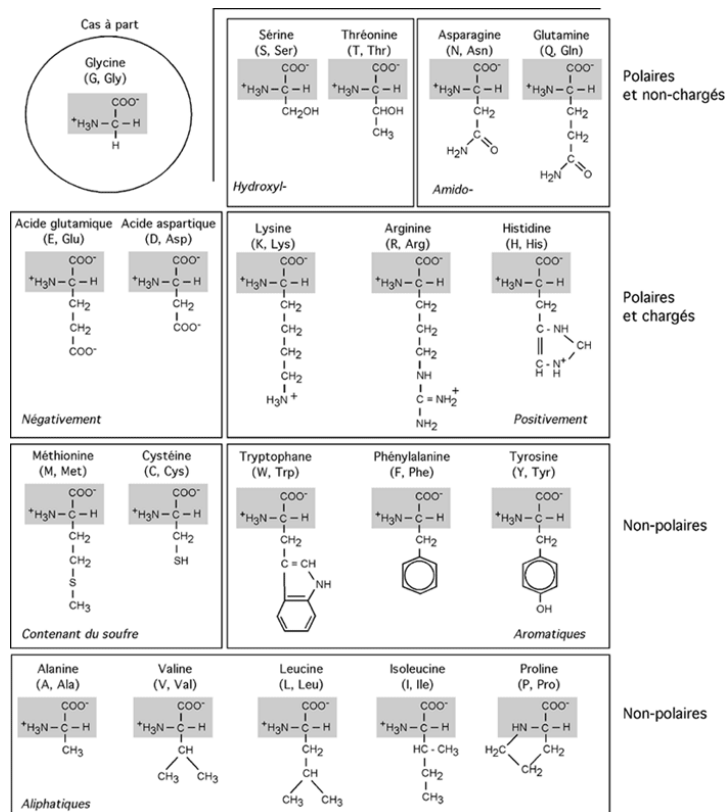


Figure 34 : Structure chimique des vingt acides aminés

Les trois grands rôles des acides aminés sont :

- Un rôle structurel puisque les protéines sont formées par l'assemblage de plusieurs acides aminés entre 10 et 2000. Il existe donc de multiples protéines avec des fonctions variées, mais une seule petite modification dans la structure des protéines peut altérer leur fonction.
- Un rôle fonctionnel puisque les acides aminés sont les précurseurs de nombreuses molécules importantes tel que les hormones, les enzymes, les neuromédiateurs et peuvent également stimuler la synthèse protéique au niveau musculaire.
- Un rôle énergétique puisque les protéines sont utilisées comme source d'énergie lors des sports d'endurance de longue durée tel que les ultra-trail, lors d'un jeûne, lors d'infection ... En effet elles n'ont pas comme fonction première d'assurer un rôle de carburant, en revanche il leur est possible de pallier dans des situations d'urgence au cours desquelles les lipides ou glucides viennent à manquer.(29)

Pour les athlètes d'endurance, les recommandations d'apport protéiques sont au-dessus de la norme pour un sédentaire afin de réparer les microlésions musculaires qui se sont créées durant la course. Les recommandations se situent autour de **1,2 à 1,7 grammes par kilogrammes par jour**.(30) Il faut faire attention à ne pas augmenter trop les quantités car sinon l'athlète se retrouverait en acidose, ce qui majorerait les douleurs tendineuses et l'inflammation. Cette ration quotidienne doit être équilibrée et doit contenir tous les acides aminés essentiels en quantité adaptée. Si un acide aminé venait à manquer, la synthèse protéique ne pourrait se faire et fonctionner normalement. Cela altérerait les capacités fonctionnelles de notre organisme, notamment celles des muscles et des transporteurs d'oxygène qui sont très importants pour le sportif. (31)

Afin de traduire l'équilibre en acide aminés des aliments, un classement a été établi, il s'agit de la « valeur biologique » des protéines. La valeur de référence étant celle de l'œuf et est égale à 100.

On retrouve parmi les valeurs les plus élevées les protéines animales. Elles sont bien plus intéressantes que les végétales car elles sont riches en acides aminés essentiels et sont très digestes ce qui n'est pas le cas des protéines végétales.

Les protéines animales sont retrouvées majoritairement dans le lait, les produits laitiers, les œufs, la viande et le poisson, tandis qu'on retrouve les protéines végétales dans les légumineuses, les fruits protéolagineux, les algues et les céréales.

Petite remarque, à l'île de la Réunion, la cuisine locale est parfaite puisqu'elle contient une portion de riz (dans lequel il manque le plus souvent la Lysine), une portion de grains (lentilles ou pois) (dans lesquels il manque la méthionine) et une portion de viande ou poisson. Une assiette complète apporte donc tous les acides aminés essentiels dont l'organisme aura besoin.

Les BCAA

Les BCAA ou « Branched-chain amino acids » sont des acides aminés qui constituent au niveau structurel un tiers des protéines des muscles squelettiques. Il s'agit de la Valine, la Leucine et l'Isoleucine.

Elles ont plusieurs rôles importants pour le sportif d'endurance et agissent sur les performances physiques mais également mentales.

Les muscles les utilisent à des fins énergétiques lors d'efforts de longue durée afin de limiter la dégradation musculaire et pour économiser les réserves en glycogène musculaire.

Leur consommation permet également de limiter la fatigue nerveuse centrale survenue au cours de la course.

Leur consommation, liée à la production d'alanine et de glutamine augmente le taux d'ammoniac sérique ce qui peut conduire à une baisse de la coordination motrice et entraîner des nausées. Mais ces effets secondaires restent légers et ne limitent pas l'utilisation des BCAA avant les courses.

C. Orientation micronutritionnelle

La micronutrition est une discipline née dans la révolution nutritionnelle de 1990. Elle est fondée sur le précepte hippocratique selon lequel l'Homme doit considérer l'aliment comme son premier médicament.

En 1997 l'Institut Européen de Diététique et de Micronutrition (IEDM) est fondé. Cette association, présidé par le Docteur Didier Chos médecin généraliste à la retraite, va développer l'information et la formation en diététique et micronutrition auprès des professionnels de santé et leurs patients.

En 2000 est créé le diplôme universitaire d'alimentation santé et en micronutrition ouvert aux médecins, pharmaciens et professions paramédicales.

Qu'est-ce que la micronutrition ?

La micronutrition est une nouvelle approche de la santé ayant pour objectif principal de faire progresser le système de soins médicalisés en accordant une place prépondérante à l'alimentation/santé et à la complémentation individualisée. Chacun est unique, pourvu de son métabolisme et de ses propres besoins. Cette discipline considère l'individu dans sa globalité : quelle est son style alimentaire ? Quels sont ses antécédents ? Sa personnalité ? Son état de santé ? Quels sont ses besoins spécifiques ? (16)

L'Homme moyen sur lequel sont basées de nombreuses recommandations d'ordre nutritionnel n'existe pas, l'Homme moderne présente beaucoup moins d'uniformité qu'on ne le pense.

La micronutrition va se baser là-dessus. Son principe essentiel est d'identifier les origines nutritionnelles de dysfonctionnements cellulaires et tissulaires pour ensuite proposer des stratégies correctrices destinées à restaurer les fonctions perturbées. Les troubles fonctionnels résulteraient de l'existence de déséquilibres, de déficits ou d'intolérances à des constituants de notre alimentation.

La micronutrition repose donc sur l'étude des vitamines, des acides gras, des acides aminés et des oligoéléments, qui sont pour la plupart des micronutriments que l'organisme humain ne peut pas synthétiser et qu'on doit impérativement trouver dans notre alimentation.

Elle repose sur deux grands piliers :

→ Le premier pilier correspond à l'amélioration des capacités digestives et d'assimilation des aliments et micronutriments par l'organisme. Pour cela, le spécialiste doit identifier les aliments perturbants et les substituer par d'autres mieux acceptés, procéder à un rééquilibrage de la flore intestinale au moyen de pro- ou pré-biotiques, utiliser des enzymes d'origine végétale, tout ça dans le but d'améliorer l'assimilation des nutriments.

→ Le second pilier fait référence à une notion essentielle également partie intégrante du médicament : la biodisponibilité. En effet, une alimentation n'est efficace que si elle est bien assimilée et reconnue par nos cellules.

Ces deux piliers s'articulent autour de deux axes :

→ L'individualisation, car chaque individu est unique. Il est nécessaire de systématiquement évaluer si l'individu concerné a un réel besoin d'une complémentation alimentaire. Par exemple, consommer des oméga-3 ou des vitamines sous forme de compléments alimentaires n'est utile que si l'individu affiche un déficit de ces acides gras ou de ces vitamines dans son alimentation, qu'elle présente une difficulté à les assimiler ou a un besoin supérieur dû à une activité sportive spécifique. Dans le cadre de nos activités au comptoir en pharmacie, on peut constater que beaucoup de gens nous sollicitent pour des compléments alimentaires, or souvent ils sont inutiles, du moins dans l'immédiat.

→ La diversité, car chaque nutriment a plusieurs rôles à jouer dans l'organisme. Si on admet que le calcium est bon pour les os c'est juste mais insuffisant. Ce minéral intervient également dans la conduction nerveuse, les contractions musculaires lisses et striées, la coagulation... Il est donc nécessaire de considérer l'aliment ou le nutriment dans la globalité de ses fonctions.

Pour les sportifs ?

Chez les athlètes, la micronutrition vise à prévenir de possibles besoins supplémentaires consécutifs à l'exercice, afin de permettre de maintenir les fonctions physiologiques et un bon état de santé en dépit des importantes sollicitations auxquelles ils sont soumis. Elle vise à favoriser les adaptations recherchées par l'entraînement et à prévenir les risques de surmenage et de décompensation inhérents à l'activité physique soutenue.(16)

Outils pour une consultation de micronutrition :

Lors de la consultation, le médecin micronutritionniste doit s'intéresser de près à son patient en utilisant dans un premier temps des questionnaires afin de mieux le connaître pour mieux le soigner. (32)

Le Questionnaire Alimentaire (QA) : (33)

Un questionnaire alimentaire sur une journée doit être rempli par le patient. Il permet d'explorer le nombre de portions consommées aux trois principaux repas de la journée. Les portions sont réparties en cinq groupes s'appuyant sur la pyramide alimentaire d'inspiration crétoise.

Le but étant de déceler un éventuel déséquilibre alimentaire, on interroge le patient sur la fréquence de consommation de ces aliments sur une semaine afin d'ensuit équilibrer harmonieusement son alimentation.

○ QUELLES SONT VOS HABITUDES ALIMENTAIRES ?

● **Boissons : quelle quantité buvez-vous chaque jour ?**

Eau	laquelle	Soda	lesquels
Vin	lesquels	Alcool	lesquels
Café	Thé		

● **Combien de fois par semaine consommez-vous... ?**

De la viande	lesquelles	mode de cuisson
Du poisson	lesquels	mode de cuisson
Des oeufs		modes de cuisson

Des produits laitiers

Lait	Quelle quantité par jour ?	Lait écrémé
Lait entier	Lait 1/2 écrémé	Autre
Lait de vache	Lait de chèvre	
Fromages	lesquels	
Yaourts	lesquels	

Des céréales

Du pain	lesquelles	Des fruits
Des féculents (pâtes, riz, pommes de terre)	lequel	Des légumes cuits
Des légumineuses (lentilles, haricots blancs, pois, fèves)		Des crudités

Des pâtisseries (gâteaux, sucreries, barres chocolatées)

Des viennoiseries (croissants, pains au chocolat...)

Quelle(s) huile(s) d'assaisonnement utilisez vous ?

○ QUEL EST VOTRE ÉQUILIBRE ALIMENTAIRE SUR UNE JOURNÉE ?

Nombre de portions	Eau Gr 1	Protéines Gr 2	Laitages Gr 3	Produits céréaliers Gr 4	Fruits et légumes Gr 5	Sucreries et boissons sucrées
Petit Déjeuner						
Déjeuner						
Goûter						
Dîner						
En dehors des repas						

○ COMMENT CALCULER VOS PORTIONS ? J'UTILISE LES ÉQUIVALENCES DE PORTIONS ...

	1 portion =
Groupe 1 : Eau	1 verre de 25 cl
Groupe 2 : Protéines	1 morceau de viande = 1 part de poisson = 2 oeufs
Groupe 3 : Laitages	1 bol de lait = 1 yaourt = 1 part de fromage (environ 1/8 de camembert)
Groupe 4 : Produits céréaliers	1 bol de céréales, de muesli ou de flocons d'avoine = 1 morceau de pain = 1 tarte = 1 assiette de riz, de pâtes ou de pommes de terre = 1 assiette de lentilles ou de haricots blancs = 1 assiette de semoule
Groupe 5 : Fruits et légumes	1 fruit = 1 salade de fruits = 1 compote = 1 salade = 1 crudité = 1 assiette de légumes cuits
Sucreries et boissons sucrées	20 cl de boisson sucrée = 1 barre chocolatée = 1 gâteau = 1 croissant = 5 bonbons

IEDM

Figure 35 : Questionnaire Alimentaire

Le Questionnaire de Vulnérabilité Digestive (QVD) :

Ce questionnaire permet d'en savoir plus sur les antécédents du patient comme par exemple des allergies connues, des pathologies chroniques dans la famille proche. On peut même rajouter la demande de la place dans la fratrie car il est noté que lors de l'enchainements de grossesses, la mère est de plus en plus carencée, donc l'enfant aussi.

A. ANTÉCÉDENTS FAMILIAUX

Avez-vous un antécédent familial (père, mère ou frère, soeur), qui ait présenté une ou des infections suivantes :
(Cocher si réponse positive)

- Allergie
- Diabète
- Maladie de Crohn
- Maladie coeliaque
- Rhumatisme inflammatoire
- Psoriasis

TOTAL A
(nbre de cases cochées) =

B. ANTÉCÉDENTS PERSONNELS

Avez-vous un antécédent personnel parmi les infections suivantes :
(Cocher si réponse positive)

- Allergie
- Intolérance au lait
- Eczéma
- Urticaire
- Asthme
- Infection digestive

TOTAL B
(nbre de cases cochées) =

C. ACTUELLEMENT, ÊTES-VOUS SUJET

À UNE DES PERTURBATIONS SUIVANTES :

- Trouble digestif fréquent
- Fatigue permanente
- Troubles de l'humeur
- Infections récidivantes
- Problèmes de peau
- Douleurs traînantes des articulations
- Migraines récidivantes

TOTAL C
(nbre de cases cochées) =

D. ACTUELLEMENT PRÉSENTEZ-VOUS ?

- Une intolérance alimentaire
- Une intolérance au gluten
- Un rhumatisme inflammatoire
- Un diabète
- Une maladie digestive
- De l'asthme
- Une maladie de la peau

TOTAL D
(nbre de cases cochées) =

TOTAL Q.V.D. =

IEDM

Figure 36 : Questionnaire de vulnérabilité digestive

Le questionnaire Dopamine-Noradrénaline-Sérotonine (DNS) : (33)

Il existe ensuite un questionnaire d'exploration de la fonction cérébrale qui mesure l'impact de l'alimentation du patient sur son fonctionnement. Il permet de faire le lien entre fatigue passagère, irritabilité, troubles de la concentration et un déficit en neurotransmetteurs.

	0	1	2	3	
DOPAMINE					
● Vous sentez-vous moins motivé(e) ?					
● Portez-vous moins d'intérêt à vos occupations ?					
● Avez-vous tendance à vous replier sur vous ?					
● Etes-vous moins attiré(e) par vos hobbies ?					
● Recherchez-vous moins les contacts avec vos ami(e)s ?					
● Avez-vous des problèmes de concentration ?					
● Vous sentez-vous l'esprit moins créatif ?					
● Avez-vous des difficultés à faire de nouveaux projets ?					
● Votre sommeil est-il agité, non reposant, insatisfaisant ?					
● Vous sentez-vous fatigué(e) ?					
					TOTAL = ○
NORADRENALINE					
● Vous sentez-vous déprimé(e) ?					
● Souffrez-vous moralement ?					
● Avez-vous l'impression de fonctionner au ralenti ?					
● Ressentez-vous moins de désir ?					
● Avez-vous des difficultés à prendre du plaisir ?					
● Ressentez-vous une baisse d'appétit sexuel ?					
● Avez-vous des difficultés avec votre mémoire ?					
● Avez-vous des difficultés pour apprendre ?					
● Vous sentez-vous mal aimé(e) ?					
● Etes-vous fatigué(e) moralement ?					
					TOTAL = ○
SEROTONINE					
● Vous sentez-vous irritable ?					
● Vous sentez-vous impatient(e) ?					
● Avez-vous des difficultés à supporter les frustrations et les contraintes ?					
● Vous sentez-vous agressif(ve) ?					
● Vous sentez-vous incompris(e) ?					
● Etes-vous attiré(e) par le sucré ou le chocolat en fin de journée ?					
● Vous sentez-vous dépendant(e) d'activité répétitive ? (tabac, alcool, grignotage, sport intensif, achats compulsifs)					
● Avez-vous des difficultés à vous endormir ?					
● Vous sentez-vous vulnérable au stress ?					
● Vous sentez-vous « d'humeur changeante » ?					
					TOTAL = ○
					TOTAL D. N. S. = ○

Figure 37 : Questionnaire dopamine noradrénaline sérotonine

Le Dépistage de Déficience Micronutritionnelle (DDM) : (33)

Ce questionnaire permet de détecter l'impact de l'alimentation du patient sur le fonctionnement de son organisme. Les questionnaires sont divisés par items :

- Troubles de l'humeur et de la fatigue
- Troubles fonctionnels digestifs
- Troubles ostéo-articulaires
- Troubles infectieux
- Troubles cutanés
- Troubles circulatoires

	0	1	2	3	
A - FATIGUE ET TROUBLES DE L'HUMEUR Je me sens fatigué(e) J'ai des difficultés à me motiver J'ai des problèmes de sommeil J'ai des difficultés de concentration J'ai des difficultés de mémoire Je me sens anxieux(se) Je me sens angoissé(e) je me sens déprimé(e)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Total score A = <input type="text"/>
B - TROUBLES DIGESTIFS Je ressens des brûlures à l'estomac J'ai des reflux acides Je ressens des nausées J'ai des diarrhées Je suis constipé(e) Je présente des alternances diarrhée/constipation J'ai des ballonnements après manger J'ai des crises de colite	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Total score B = <input type="text"/>
C - TROUBLES OSTÉO-ARTICULAIRES ET DÉGÉNÉRATIFS Je ressens des douleurs au niveau du dos, du cou Je souffre des articulations (poignets, coudes, épaules, chevilles, genoux, hanches) J'ai mal dans les muscles, les tendons Quand je fais du sport, je me blesse facilement J'ai une maladie rhumatismale Je souffre des yeux (cataracte, yeux secs...)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Total score C = <input type="text"/>
D - TROUBLES INFECTIEUX Je présente régulièrement les troubles suivants : <ul style="list-style-type: none">• maux de gorge, angines, rhumes, sinusites, otites• bronchites, infections des poumons J'ai régulièrement des infections urinaires J'ai régulièrement des infections génitales J'ai régulièrement des infections digestives J'ai régulièrement des infections cutanées	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Total score D = <input type="text"/>
E - TROUBLES CUTANÉS J'ai la peau sèche Je fais régulièrement de l'eczéma Je fais de l'acné J'ai souvent de l'herpès au niveau du visage Je perds mes cheveux ; ils sont ternes, cassants Mes ongles sont cassants ; ils se dédoublent	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Total score E = <input type="text"/>
F - TROUBLES CIRCULATOIRES J'ai les jambes lourdes Je fais de l'oedème (chevilles, mains, doigts...) J'ai souvent les extrémités froides J'ai des fourmillements aux extrémités J'ai des troubles avant les règles (seins tendus, douleurs, fatigue, déprime)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Total score F = <input type="text"/>

Figure 38 : Dépistage de déficience micronutritionnelle

IEDM

Le micronutritionniste interprète l'ensemble des résultats des questionnaires précédents pour en faire un schéma alimentaire qui visera à corriger les troubles présentés. Dans un deuxième temps, si le régime adopté par le patient ne fonctionne pas totalement, le professionnel de santé pourra affiner les explorations fonctionnelles en faisant appel à la biologie médicale afin de préciser son diagnostic. (32)

1. Les vitamines

Les vitamines sont des composés indispensables au bon fonctionnement de notre organisme. Malheureusement, excepté la vitamine D celui-ci ne sait pas les fabriquer. Elles devront donc être apportées par l'alimentation. Certaines sont particulièrement importantes pour l'athlète d'endurance et méritent une attention particulière. Sachant que les athlètes ont des besoins plus accrus que le sédentaire puisque les pertes sont augmentées et que l'absorption intestinale est diminuée.

On distingue deux types de vitamines, celles qui sont hydrosolubles et celles qui sont liposolubles. Alors que les vitamines hydrosolubles doivent faire partie de la ration quotidienne, les vitamines liposolubles par leur capacité à être stockées dans le foie et les tissus adipeux peuvent être consommées à des intervalles moins réguliers.

- Les vitamines hydrosolubles :

On retrouve les vitamines du groupe B qui participent à la transformation des glucides, des protéines et des acides gras pour fournir l'énergie indispensable aux muscles. Elles sont donc très utiles pour les sportifs d'endurance.

	Intérêts pour les sportifs d'endurance	Sources
B1	Rôle dans le fonctionnement nerveux Rôle dans l'activité musculaire Rôle dans le métabolisme des glucides	Viandes Poissons Pain complet Oeufs
B2	Rôle dans la production d'énergie au niveau des mitochondries	Abats Viandes Oeufs
B3	Rôle dans la production d'énergie à partir des glucides, lipides et protéines	Foie Viandes Pain complet Oeufs
B5	Rôle dans la production d'énergie à partir des glucides, lipides et protéines	Abats Jaune d'œufs Champignons
B6	Rôle dans la production d'énergie Rôle dans la synthèse des protéines Rôle dans la fabrication de l'hémoglobine	Foie Légumes secs Bananes

	Rôle dans la protection cardiovasculaire	Viandes et poissons
B9	Rôle dans la croissance cellulaire notamment les globules rouges Rôle dans la prévention cardiovasculaire en diminuant le taux d'homocystéine	Foie Légumes à feuilles vertes Légumes secs Céréales complètes
B12	Rôle dans le métabolisme des protéines Rôle dans la production des globules rouges	Abats Huîtres et coquillages Poissons et viandes Fromage

Tableau 4 : Les vitamines hydrosolubles

On retrouve également la vitamine C qui stimule les cellules immunitaires donc participe aux défenses des infections, surtout les infections respiratoires hautes qui sont fréquentes chez les sportifs et qui peuvent gêner leurs entraînements. Elle participe à la structure des tissus et des os et à un rôle antioxydant. On la retrouve dans les légumes et les fruits et ne peut pas être stockée, c'est pourquoi sa consommation doit être quotidienne. Les fruits et légumes doivent être consommés crus puisque la vitamine C est sensible à la chaleur et à la lumière.

- Les vitamines liposolubles :

	Intérêt pour les sportifs d'endurance	Sources
A	Rôle dans la croissance cellulaire Rôle dans l'immunité	Foie Beurre Œufs Fromage
Carotènes	Rôle antioxydant	Fruits et légumes mais surtout les carottes, cresson, épinards
D	Rôle dans le maintien de l'équilibre phosphocalcique en favorisant leur absorption intestinale Rôle dans la minéralisation osseuse Rôle dans l'immunité	Exposition solaire à 90% Poissons gras Foie Jaune d'œufs
E	Rôle d'antioxydant	Huile de colza, d'olive, de tournesol Fruits secs Beurre

Tableau 5 : Les vitamines liposolubles

La vitamine K est également une vitamine liposoluble mais n'a pas vraiment d'intérêt spécifique pour le sportif d'endurance donc nous ne la détaillerons pas. On note une réelle synergie entre la prise de vitamine C et de vitamine E.

2. Les antioxydants

Rappelons que lors de la consommation d'oxygène pour produire de l'énergie, une petite partie s'échappe du processus pour former des formes réactives de l'oxygène appelés radicaux libres. L'inflammation et la lutte contre les toxiques peuvent également conduire à la formation de radicaux libres. On peut donc se douter que l'organisme d'un sportif d'endurance produit plus de radicaux libres puisqu'il a une consommation accrue d'oxygène, qu'il subit des agressions par les muscles à l'effort, qu'il peut avoir éventuellement une inflammation chronique et peut être sujet à des agressions extérieures comme l'altitude, les UV, les polluants...

Les radicaux libres vont ensuite induire des altérations de l'ADN, de l'oxydation des lipides, des protéines et des altérations des mitochondries. Normalement ces radicaux libres sont neutralisés par notre système antiradicalaire constitué d'enzymes antioxydantes telles que les superoxydes dismutases (SOD), la glutathion peroxydase (GPX) et la catalase. Ces enzymes ont besoin de cofacteurs pour fonctionner qui proviennent de l'alimentation comme le cuivre, le zinc et le manganèse pour les SOD, le sélénium pour la GPX et le fer pour la catalase. Ces cofacteurs sont solubles dans les graisses d'où l'intérêt d'en consommer avec de l'huile. Les radicaux libres peuvent être également piégés par des substances apportées par l'alimentation qui vont venir les piéger, ce sont les vitamines C et E, les polyphénols et les caroténoïdes.

Classiquement, le corps médical se divise en deux camps. Il y a ceux qui pensent que la pratique sportive produit plus de radicaux libres et qu'il faut donc supplémenter l'athlète en antioxydant et ceux qui doutent de l'intérêt des antioxydants et réfutent l'idée de donner le moindre complément. Lorsque les médecins proposent une supplémentation en antioxydant, elle est la même pour tous les athlètes. Or, en micronutrition, l'approche va être totalement différente. La supplémentation sera faite seulement si l'athlète possède des signes évocateurs d'un stress oxydatif mal géré tel qu'un œil sec, de l'arthrose, des infections ou inflammations. Le but sera non seulement de neutraliser les radicaux libres mais en plus de limiter leur production grâce à une meilleure maîtrise de l'inflammation et un meilleur système digestif intègre. Par exemple, l'apport d'éléments nutritionnels capables d'enrayer une inflammation chronique, une agression des membranes ou encore un désordre atteignant la sphère digestive. Cette prise en charge peut être très satisfaisante pour les pathologies musculaires et tendineuses.

Tout d'abord il faut savoir que les radicaux libres ne sont pas toujours néfastes, ce qui est important est donc l'état d'équilibre entre les radicaux libres et les antioxydants. On parle de stress oxydant lorsque les radicaux libres sont en excès par rapport aux antioxydants.

L'équilibre de la portion alimentaire est donc primordial puisque la majorité des antioxydants sont retrouvés dans l'alimentation. La pyramide d'inspiration crétoise permet de satisfaire les besoins des différents antioxydants et de garantir une protection cellulaire optimale. Il y a trois règles fondamentales qui sont : l'importante consommation de fruits et légumes, le bon choix des huiles et la consommation d'épices.

Dans l'alimentation on retrouve comme antioxydant :

- La vitamine E qui s'intègre dans la membrane cellulaire et qui empêche la lipoperoxydation des lipides par les radicaux libres. Ainsi que la vitamine C qui régénère la vitamine E après qu'elle ait joué son rôle antioxydant.
- Les minéraux tels que le zinc, le sélénium, le cuivre, le manganèse.
- Les caroténoïdes qui sont des colorants naturels produits par les végétaux qui donnent une couleur jaune-orangé. Certains sont des provitamines A, c'est-à-dire que l'organisme les transforme en vitamine A. On retrouve dans cette famille le lycopène présent surtout dans les tomates mais également dans la pastèque et le pamplemousse qui neutralise les radicaux libres. On retrouve aussi le bêta-carotène qui neutralise certains radicaux libres et limite la lipoperoxydation, présent dans les carottes, les citrouilles, la patate douce, les poivrons... La dernière sous famille est la lutéine et la zéaxanthine qu'on retrouve dans les légumes vert foncé et les kiwis et qui sont intéressantes dans la prévention de la DMLA, dégénérescence maculaire liée à l'âge.
- Les polyphénols qui sont une vaste classe de pigments végétaux capables de neutraliser les radicaux libres. De manière générale, la teneur en polyphénols diminue avec le mûrissement du fruit ou légume à l'exception des anthocyanes. Le stress environnemental favorise le développement des antioxydants d'un végétal. Il existe plusieurs sous familles dont la plus importante est celle des flavonoïdes très présents dans les fruits et légumes. On retrouve également les phénols simples et acides phénoliques présents dans le thé, café et la vanille, les stilbènes présents dans le vin rouge, les lignanes présents dans les graines de lin, de sésame et dans les céréales complètes, la curcumine présente dans le curcuma et le gingérol qui est le composé principal du gingembre.

Comme nous le voyons, les principaux antioxydants se retrouvent dans les fruits, les légumes et les épices comme le curcuma. Il est donc important d'en consommer à chaque repas. Il est également nécessaire de consommer de l'huile simultanément puisque ces composés sont liposolubles, mais pas n'importe laquelle. La qualité des huiles est aussi importante puisque chaque huile est composée de différentes familles d'acides gras qui vont jouer sur la santé et les performances de l'athlète. Le mélange idéal pour un équilibre harmonieux entre les acides gras saturés, monoinsaturés, oméga-3 et oméga-6 est : consommation quotidienne de deux cuillères à soupe d'un mélange de 60% d'huile d'olive et de 40% d'huile de colza, première pression à froid.

Nutrition pays, les conseils des « gramouns » :

Une petite recette naturelle intéressante donnée par David, coach des traileurs locaux du Grand Raid. Il tient cette recette de ses anciens qui consommaient une « pâte » préparée maison en guise d'anti-inflammatoire naturel.

Cette recette contient :

- Une tête d'ail
- Trois morceaux de gingembre
- Deux cuillères de curcuma
- Un demi jus de citron
- Tout ça mélangé dans deux tiers de miel pays.

Il conseille de prendre une cuillère à café de cette mixture tous les matins pendant quinze jours au moindre problème tendineux, musculaire.

Le curcuma :

A l'île de la Réunion, l'influence des indiens est encore bien présente et le curcuma est très consommé par la population locale dans les « carry ». Ce colorant jaune orangé a de nombreux effets bénéfiques pour la santé. Il est antioxydant, anti-inflammatoire, antiallergique, il permet de prévenir les cancers,(34) de lutter contre les ulcères digestifs en stimulant la production de mucus gastrique et permet également de lutter contre le stress.

Le curcuma est un mélange de pigments polyphénoliques appelés curcumoïdes dont le principe actif le plus puissant est la curcumine. Celui-ci est mieux absorbé dilué dans une matière grasse et en présence de poivre noir.

Le gingembre :

Le gingembre aussi fait partie intégrante de la vie culinaire des réunionnais. Le gingérol étant le composé phénolique principal du gingembre, il est antioxydant, anti-inflammatoire, antiémétique et antihistaminique. Sa consommation est donc recommandée pour les coureurs du grand raid comme anti-inflammatoire naturel. Il peut aussi influencer sur le métabolisme des dérivés des oméga-3 et oméga-6 et donc sur l'inflammation ou l'agrégation plaquettaire. (35)

3. Les Acides Gras essentiels : oméga-3 et oméga-6

De nombreux sportifs pensent qu'il faut éliminer les matières grasses pour leur régime. Mais au contraire, les lipides sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme et aux performances sportives surtout chez les athlètes d'endurance. En revanche, il faut consommer mieux. C'est-à-dire, limiter les apports en lipides saturés, et augmenter les apports en lipides polyinsaturés, notamment en oméga-3, trop peu présent dans les rations quotidiennes de la nouvelle génération. Il faut atteindre également un équilibre harmonieux entre les acides gras de la lignée oméga-3 et ceux de la famille des oméga-6 puisqu'il agit sur l'équilibre de la composition des membranes.



En revanche il est difficile d'évaluer le statut lipidique d'une personne en fonction du contenu de son assiette puisqu'il peut y avoir des problèmes d'assimilation. En effet, les systèmes digestifs, hépatiques et biliaires étant souvent perturbés, une partie des lipides peut échapper au processus d'émulsion, de digestion et d'assimilation. Pour un sportif, on est sûre que s'il ne consomme pas d'huile de colza pour se supplémenter, il aura une insuffisance en acide alpha-linolénique.

Dans les acides gras polyinsaturés on retrouve deux acides gras essentiels qui sont l'acide linoléique qui est le chef de file de la famille des oméga-6 et l'acide alpha-linolénique qui est le chef de file de la famille des oméga-3 qui est l'acide gras du régime crétois. Ces substances sont retrouvées dans le lin, d'où le nom très proche donné à ces deux molécules. Ces acides gras sont dits « essentiels » puisqu'ils ne peuvent être synthétisés par l'organisme, ils doivent donc être apportés par l'alimentation.

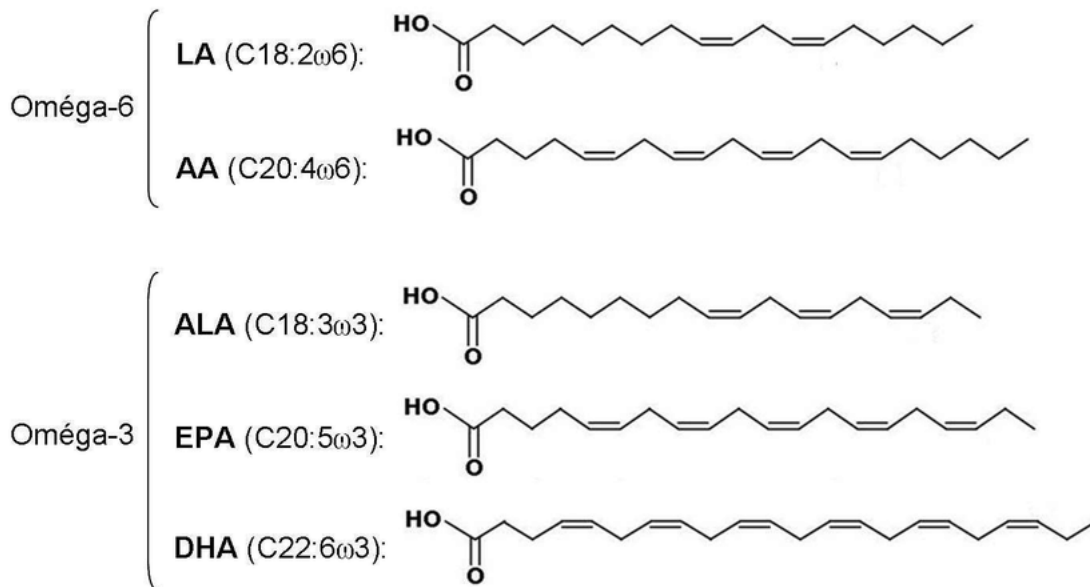


Figure 39: Structure chimique des oméga-3 et oméga-6

La nomenclature des acides gras va permettre de déterminer leur classe. Ils possèdent une fonction carboxyle, une longue chaîne linéaire de 4 à 24 carbones et un nombre pair d'atomes de carbone.

La mention C18 signifie que la molécule comprend 18 atomes de carbone en les numérotant à partir du groupe carboxyle. La mention « 2 » signifie que la molécule possède deux doubles liaisons et la mention « ω6 » signifie que la première double liaison rencontrée en partant du méthyle est en position 6, l'acide gras appartient donc à la famille des oméga-6.

Les acides linoléiques et alpha-linoléniques vont subir, après leur absorption, une série de transformations effectuées par des enzymes dans le but d'ajouter des couples d'atomes de carbone, et d'additionner des doubles liaisons pour fabriquer des substances primordiales pour le bon fonctionnement de l'organisme.

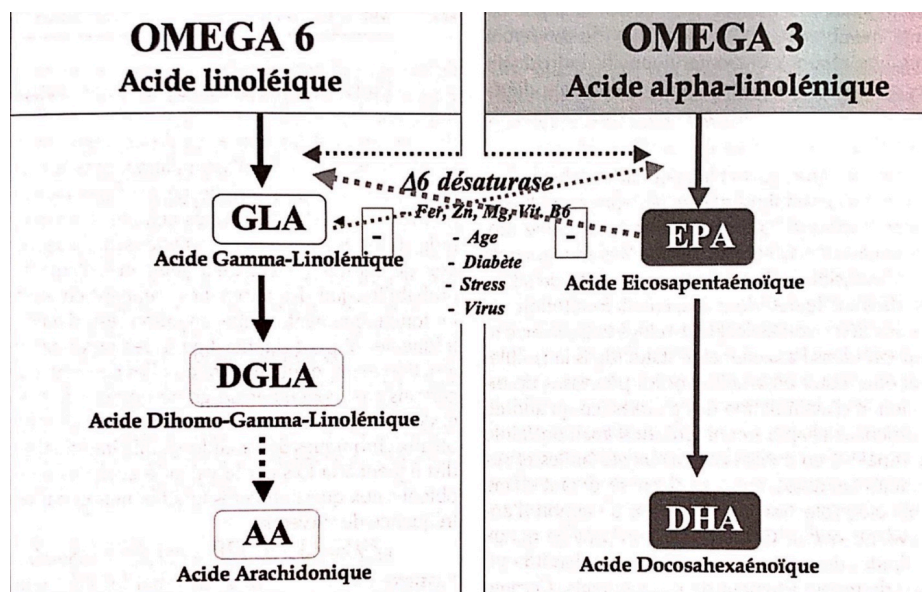


Figure 40 : La synthèse des acides gras polyinsaturés

A partir de l'acide linoléique vont se former des acides gras de la famille des oméga-6 et à partir de l'acide alpha-linolénique vont être synthétisés des acides gras oméga-3.

La delta-6 désaturase est la première enzyme à intervenir et va agir sur les deux acides gras essentiels. Ils se retrouvent donc en compétition et la proportion respective de ces deux acides gras va décider la prédominance des dérivés d'une voie par rapport à l'autre. D'où la nécessité d'un rapport optimal entre ces deux acides gras. Cette enzyme fait intervenir des cofacteurs qui potentialisent son effet tel que le fer, le magnésium ou encore le zinc. (36) Un déficit de l'un d'entre eux va donc affecter le niveau de fonctionnement de cette enzyme et la synthèse des dérivés supérieurs des acides gras essentiels. (37) L'âge, l'exposition à un stress chronique, le diabète et la présence de certains virus peuvent également en altérer l'efficacité. (38)

L'acide linoléique se transforme donc en acide gamma-linolénique (GLA) grâce à la delta-6 désaturase. Le GLA se transforme ensuite en acide dihomo-gamma-linolénique (DGLA) qui est un acide gras important en tant que précurseur des prostaglandines. Le DGLA peut se transformer par la suite en acide arachidonique (AA) mais cette transformation est faible puisque l'AA est apporté en abondance par l'alimentation.

L'acide alpha-linolénique se transforme lui en acide eicosapentaénoïque (EPA) par le même système enzymatique. L'EPA se transforme en acide docosahexaénoïque (DHA) qui est l'acide gras le plus long des acides gras de la famille des oméga-3. (39)

Les deux premiers dérivés diminuent la synthèse de celui de la voie concurrente.

La deuxième étape se déroule difficilement dans les tissus, surtout à mesure que ceux-ci vieillissent. Mais certains de ces acides gras peuvent être retrouvés dans notre ration pour palier à ce déficit : on retrouve l'acide arachidonique dans la viande, la peau des volailles, les œufs et la cervelle. Tandis que l'EPA et le DHA sont présents en grande quantité dans les poissons gras des eaux froides.

Parallèlement, le DGLA, l'EPA et l'AA peuvent être transformés par l'action de plusieurs enzymes dans des réactions annexes pour fabriquer des substances primordiales tels que les prostaglandines ou des molécules de la famille des eicosanoïdes (prostacyclines, leucotriènes, thromboxane) qui interviennent dans l'immunité, l'inflammation, la vasoconstriction et le contrôle du métabolisme. Eux même nécessite également un bon équilibre alimentaire puisqu'il va décider de la façon dont l'équilibre immunitaire ou inflammatoire va se dérouler. (40) Si la consommation en oméga-3 n'est pas assez riche, le risque inflammatoire est plus important, ce qui n'est pas idéal pour le sportif qui est déjà prédisposé à un terrain inflammatoire dû à un exercice intense. Les oméga-3 ont aussi une propriété anti-arythmique et des propriétés cognitives qui aide à diminuer le temps de réaction de l'athlète, qui ont une part non négligeable dans la capacité de performance de l'athlète.

On sait également que lors d'un effort intense, les membranes cellulaires peuvent être agressées et endommagées suite à un stress oxydatif et une augmentation des radicaux libres. Ceci malgré une alimentation riche en acide gras polyinsaturés, une bonne digestion et une bonne assimilation. L'explication est l'affinité qu'ont les radicaux libres envers les acides gras polyinsaturés. Ces agressions membranaires peuvent agir au niveau des tissus musculaires mais également au niveau des globules rouges.

Plus l'effort s'intensifie, plus la production de radicaux libres sera élevée, et il y aura à ce moment une augmentation de la peroxydation des lipides membranaires. La peroxydation est une réaction très complexe agissant en trois phases, qui concerne uniquement les lipides insaturés et qui va engendrer une diminution de la fluidité membranaire, ainsi qu'une augmentation de la perméabilité membranaire. Afin de stopper ce phénomène on peut supplémenter l'athlète en antioxydants. (16)

4. Les minéraux

- Le magnésium

Le magnésium intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques et possède de multiples fonctions dont certaines sont fondamentales pour la performance sportive. Il a un rôle dans la contraction musculaire, dans la transmission du signal nerveux, dans la production d'énergie à partir des glucides et lipides, dans la synthèse protéique ainsi que dans la gestion du stress.(39)

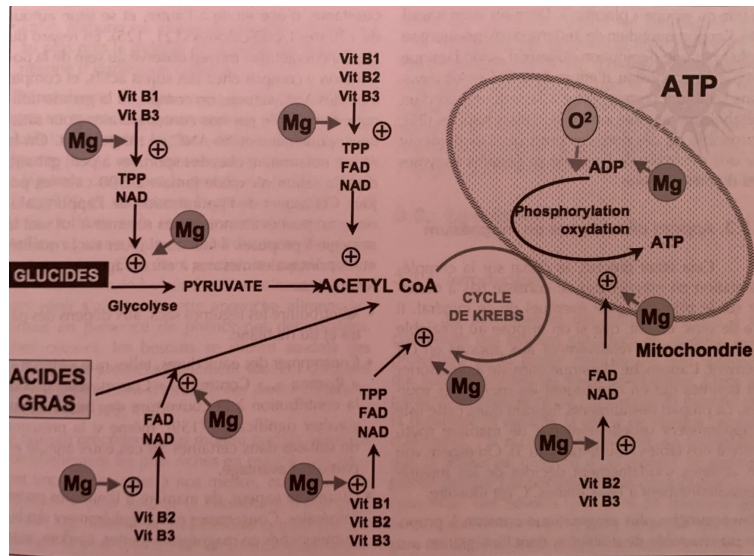


Figure 41 : Les rôles métaboliques du magnésium

Or, le magnésium est en déficit fréquent dans la population générale car il existe une tendance à une sous consommation. En effet, en répertoriant les aliments qui en constituent la meilleure source, on constate qu'ils ne font pas forcément partie des repas au quotidien (chocolat, noix de cajou, bigorneaux, flageolets, amande, céréales complètes, fruits secs, eaux minérales dures...)

De plus, la carence en magnésium est difficile à apprécier car il n'existe pas de marqueur spécifique, et il est difficilement dosable lors d'un bilan sanguin car il s'agit d'un élément à 99% intracellulaire.(41)

Ces carences ont pourtant des répercussions importantes pour le sportif car peuvent entraîner une chute de la VO₂max,(42) des crampes musculaires fréquentes, une fatigue tenace, une diminution de la tolérance à la chaleur, des troubles du sommeil et des difficultés de récupération.(43)

Face à ces signes cliniques, considérant dans le cadre de la course du Grand Raid que les pertes sudorales dues au climat sont conséquentes, on conseillera au coureur une complémentation de 300 milligrammes de magnésium, à débiter deux mois avant la course. Tout en faisant attention à ce que le sportif le tolère bien car l'effet indésirable principale est d'être laxatif.

- Le potassium

Le potassium entre en jeu dans plusieurs fonctions indispensables pour le sportif tel qu'un rôle dans la transmission de l'influx nerveux, un rôle dans la contraction musculaire, dans la synthèse des protéines, dans le métabolisme des glucides ainsi que dans l'équilibre acido-basique en tant qu'alcalinisant.

Les pertes sudorales peuvent être source d'une perte minime de potassium en cas d'effort intense, mais le vrai problème se pose surtout dans l'évolution de nos apports. Notre génération consomme trois à quatre fois moins de potassium que nos ancêtres et simultanément notre ration de sodium a beaucoup augmenté. Augmentant ainsi le rapport Na/K de vingt à mille fois en seulement un siècle (44) et entraînant des répercussions sur la santé des populations. Cette évolution constitue un facteur aggravant des accidents vasculaires cérébraux, de l'hypertension artérielle, de l'ostéoporose... (16) Il est donc conseillé de consommé au maximum des produits frais comme les fruits et légumes, les légumes secs, les tubercules et de limiter les produits industriels surdosés en sodium. Ce déséquilibre est un réel problème de santé publique auquel n'échappe pas le sportif, il pourra donc avoir des conséquences sur ses performances mais aussi sur son état de santé.

- Le sodium

Comme nous l'avons vu juste avant, les apports en sodium sont souvent supérieurs aux besoins. Il faut donc essayer de limiter les apports sodés alimentaires sans trop les réduire. Car le sodium possède tout de même un intérêt majeur chez le sportif. Il favorise l'absorption de l'eau et des glucides lors de l'effort.

Une supplémentation en sodium pendant l'effort permet de mieux maintenir les volumes plasmatiques et extracellulaires. En effet, le sodium limite la diminution du volume plasmatique pendant l'exercice et améliore la retenue du volume liquidien extracellulaire, ce qui aide à la diminution de la fréquence mictionnelle pendant la course. La supplémentation en sodium permet également de limiter la baisse de la concentration de sodium plasmatique qui conduirait à une hyponatrémie, que nous détaillerons dans la partie sur l'hydratation un peu plus loin. Effectivement, en cas d'apport insuffisant en sodium au regard du volume hydrique absorbé lors d'une course en condition de température élevée et humide, une hyponatrémie symptomatique dû à l'exercice peut survenir. Celle-ci peut être symptomatique avec des troubles neurologiques et aller jusqu'au coma, entraînant une hospitalisation. La supplémentation sera de 400 à 500 milligrammes de sodium par heure d'effort.

- Le fer

Dans l'organisme le fer se répartit en fer hémique qui correspond à 75% du fer total. Celui-ci est entre dans la composition de l'hémoglobine et de la myoglobine qui transportent l'oxygène dans le sang et dans le muscle respectivement. Les 25% restant correspondent au fer non hémique qui comprend le fer des réserves (ferritine), le fer de transport lié à la transferrine et le fer de certaines enzymes.

Le fer participe également à certaines réactions enzymatiques dans la production d'énergie par les mitochondries et participe au système de défense contre les infections. Celui-ci est donc essentiel pour le coureur d'un ultra-trail.

Les signes cliniques d'un déficit martial sont peu spécifiques isolément et sont d'apparition tardive (fatigue, pâleur, sensibilité accrue aux infections, essoufflement tachycardie...).(45) En revanche, sachant que le fer participe en tant que cofacteur enzymatique à la synthèse de neurotransmetteurs, le questionnaire fonctionnel DNS permet de poser un premier diagnostic de carence martiale, complété par les réponses au questionnaire DDM. Un bilan biologique pourra être prescrit pour confirmer le diagnostic posé par le micronutritionniste.

Les sportifs d'endurance sont fréquemment carencés en fer, et ce par plusieurs mécanismes : (46)

- Des microhémorragies digestives dues à l'effort ou la déshydratation qui entraîne des pertes de sang dans les selles. D'après une étude, ces pertes de sang mesurées dans les selles des athlètes d'endurance sont de 5 à 6,6 millilitres par jour contre 1,5 millilitres seulement pour un individu sédentaire dans des conditions normales. (47)
- La destruction des globules rouges en réponse à l'augmentation significative du débit cardiaque chez les coureurs qui entraîne des chocs dans les vaisseaux. (16)
- La destruction des globules rouges en raison de déformations excessives des globules rouges qui doivent passer dans des vaisseaux sanguins de diamètre inférieur à leur taille suite à une vasoconstriction, ceci est le phénomène « d'ischémie-reperfusion ».
- La destruction des globules rouges suite aux ondes de choc occasionnées par la course à pied.

L'approche micronutritionnelle est de confirmer le diagnostic d'un déficit en fer avec des marqueurs appropriés tel que la ferritine. Ensuite on s'attache à comprendre les causes du déficit qui peuvent être des règles abondantes pour les femmes, un don du sang récent, présence importante d'inhibiteur de l'absorption tel que le thé, un kilométrage excessif en course ou une charge d'entraînement trop importante.

Le but est de corriger les causes et d'augmenter les apports alimentaires en fer. On fournira des acides gras essentiels pour augmenter la déformabilité des globules rouges afin qu'ils puissent pénétrer plus facilement dans les vaisseaux lors de vasoconstriction. On recommandera la prise de boissons à l'effort afin d'irriguer les intestins et limiter le saignement, ou alors une consommation quotidienne de source de fer héminique à distance de l'activité physique. (16)

- Le calcium

Le calcium est le minéral le plus abondant de notre organisme. Il intervient dans la construction osseuse, dans la contraction musculaire et dans la transmission de l'influx nerveux, fonctions très importantes pour le sportif d'endurance.

Or l'assimilation de ce minéral est très complexe. Certains nutriments favorisent son assimilation comme la vitamine D ou les fibres fermentescibles, tandis que d'autres la diminuent comme l'acide phytique présente dans les légumes secs et les céréales, mais aussi le café, les phosphores présents dans les sodas et l'acide oxalique (48) présente dans quelques fruits et légumes.

Il faut également prendre en considération les pertes urinaires de calcium dues à un apport important de viande, un excès de sel, une alimentation acidifiante, (49) que l'on pourra minimiser en optimisant les apports de potassium et en alcalinisant la portion alimentaire. (50) C'est ici que nous voyons l'intérêt de la micronutrition pour les sportifs d'endurance puisque l'équilibre de l'assiette est essentiel. Sachant qu'une partie du calcium peut être absorbée au niveau du côlon, une supplémentation en prébiotique pourra être proposée au sportif pour rééquilibrer la flore intestinale et améliorer l'absorption.

- Le sélénium

Le sélénium est un antioxydant important qui agit en synergie avec la vitamine E et qui entre dans la composition de la glutathion peroxydase, enzyme fondamentale de la lutte contre les radicaux libres et le stress oxydant. Ce qui est essentiel chez les sportifs car cette activité est source de production de radicaux libres. (51)

Il permet également de réguler des hormones thyroïdiennes et de lutter contre les infections et les inflammations.

Certaines études ont montré qu'il agit également sur le bien-être et la bonne humeur, ce qui est important pour les coureurs d'ultra-trail comme le Grand Raid pour lesquels le mental est essentiel pour finir la course. (52)

On le retrouve en dose importante dans les rognons, le crabe, les noix du Brésil, les poissons et certains coquillages. Mais également dans quelques végétaux, le problème étant que leur teneur en sélénium dépend de la teneur du sol sur lequel ils ont poussé.

On sait par exemple que le sol en Europe est beaucoup plus faible en sélénium que le sol aux États-Unis.(53)

Si le sélénium est en déficit, on peut retrouver des problèmes tendineux, des infections, de l'asthme ou encore des atteintes articulaires, ce qui poserait problème pour un athlète d'endurance.

En revanche, comme on ne peut pas calculer le taux de sélénium qu'il y a dans une ration alimentaire puisque la teneur en sélénium des végétaux dépend du sol où ils ont poussé, on se doit de faire directement un bilan biologique pour déceler un déficit et ensuite prescrire ou non une supplémentation.

- Le zinc

Le zinc est un minéral qui a des propriétés anti-oxydantes, agit sur la libération d'insuline, sur la synthèse des protéines et à un rôle clé dans les défenses immunitaires. En revanche, il est mal absorbé et se retrouve constamment en compétition avec le cuivre et le fer. Et associé à ça, il est éliminé dans la sueur en quantité non négligeable lors d'un effort intense.

On le retrouve dans les huitres, la viande rouge, le comté et les légumes secs.

Une carence légère en zinc chez les athlètes peut entraîner une anorexie, une fatigue latente, une diminution de l'endurance et un risque d'ostéoporose. (54)

5. Les probiotiques et prébiotiques

Lors d'une conférence se déroulant il y a une dizaine d'années, on demande à Didier Chos, président de l'IEDM, « quel serait, selon vous, le complément à proposer le plus souvent à un sportif ? » et celui-ci répond en déroutant son auditoire « les probiotiques dans 80% des cas ».

Les probiotiques sont d'après l'OMS et la FAO (food and agricultur organization) « des micro-organismes vivants qui, administrés en quantité suffisante, exercent un effet bénéfique sur la santé de l'hôte ».

Effectivement, les athlètes d'endurance ayant très souvent des troubles digestifs, des compléments aidant à restaurer leur flore intestinale semble être le choix de référence. En revanche un nouvel article nous démontre que les probiotiques ne sont pas naturelles pour l'Homme, ils proviennent de fermentations artificielles de souches de bactéries issues de bovins la plupart du temps. Les probiotiques sont donc discriminant pour la flore intestinale humaine et en voulant traiter une dysbiose, on se rend compte qu'on en crée une autre...

Outre le fait que les probiotiques proviennent de souches issues de bovins, on ne retrouve que quelques souches, quatre ou cinq au maximum. Or, la flore intestinale d'un individu sain n'est pas composée que de quatre ou cinq familles de bactéries, mais de centaines d'espèces de bactérie différentes. Et chaque individu a un microbiote qui lui est propre, en qualité et en quantité. (55)

Si on apporte que quelques familles de bactéries, on crée un favoritisme en faveur de ces souches qui ne sont pas représentative de la flore de chacun. Un article nous informe donc des effets secondaires néfastes voir alarmants de l'utilisation des probiotiques. (56) L'apport de probiotiques retarderait la régulation de la flore intestinale personnelle en créant une flore de substitution très incomplète et déséquilibrée entraînant une dysbiose et des problèmes immunitaires.

Dans le but de restaurer la flore intestinale du sportif d'endurance, il est donc préférable de lui proposer des prébiotiques. Ce sont des composants alimentaires non digestibles qui peuvent aider à la croissance ou à l'activité de certaines populations de bactéries intestinales déjà présentes dans le microbiote de la personne.

D. L'hydratation

Agissant comme un pilier vital, aussi important que l'alimentation, l'hydratation ne doit jamais être abandonnée, c'est cette molécule composée d'oxygène et d'hydrogène qui permet d'assurer le bon fonctionnement des cellules et de permettre ainsi un métabolisme adapté aux exigences des activités sportives extrêmes. La quantité d'eau qui tend à assurer un état hydrique corporel optimal est fortement dépendante de la température extérieure, de l'hygrométrie (degré d'humidité où plus il est bas, plus l'évaporation est forte et plus l'athlète a besoin de s'hydrater), du vent (qui augmente la perte d'eau), de l'intensité, de la durée de l'exercice et du degré d'entraînement du sportif. Car on sait que les glandes sudoripares sont d'autant plus développées que le traileur est entraîné, donc l'évaporation est plus rapide et importante, reflet de l'adaptation du corps humain à l'entraînement pour mieux réguler la température centrale.

1. Composition

L'eau représente en moyenne 60 à 65% de la composition totale de notre poids et varie en fonction de la corpulence, de l'âge et du sexe. Maintenir un bon niveau d'hydratation est important pour les performances de l'athlète.

L'eau est répartie en plusieurs secteurs : le secteur intracellulaire qui représente deux tiers du volume d'eau total et qui est représenté par l'eau contenue dans les cellules. Et le secteur extracellulaire qui se répartit en milieu intravasculaire (sang) et milieu interstitiel (lymphe, larmes, liquide céphalo-rachidien).

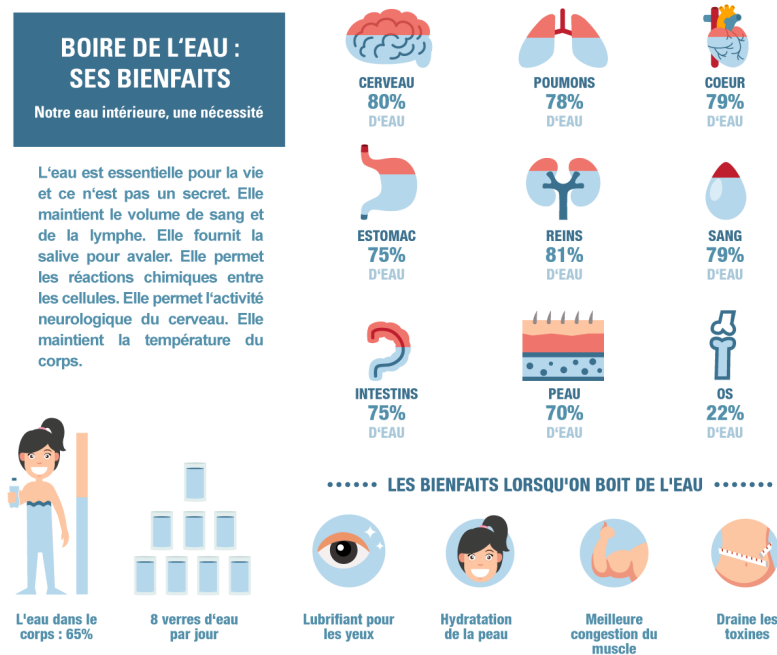


Figure 42: L'eau, élément indispensable à la vie

2. Rôles et fonctions de l'eau dans notre organisme

L'eau est indispensable au fonctionnement de l'organisme, et certaines fonctions sont fondamentales pour le sportif d'endurance.

- L'un des risques pour le coureur du Grand Raid est la surchauffe. Une grande partie de l'énergie produite pendant l'exercice (75%) se diffuse sous forme de chaleur qu'il faut évacuer pour maintenir constante la température de notre corps. La transpiration et l'évaporation de cette sueur sont des phénomènes qui permettent de diminuer la chaleur excessive, évitant l'hyperthermie puis la mort lors d'un effort de longue durée.
- L'eau participe à la structure et au volume des cellules et des tissus. A titre d'exemple, les muscles sont constitués de 75% d'eau et le cerveau de 77% d'eau.
- L'eau sert à la digestion des aliments, qui ne pourrait se faire sans. Sept litres d'eau sont sécrétés et réabsorbés chaque jour par le tube digestif afin de faciliter cette digestion.
- La circulation sanguine permet d'irriguer les tissus et d'apporter les nutriments dont l'organisme a besoin.
- L'eau permet d'éliminer les toxines et déchets produits par l'organisme au quotidien et qui sont beaucoup plus importants lors d'un ultra-trail. Cette élimination se fait via les urines, la transpiration et les selles.
- L'eau participe à plusieurs réactions enzymatiques essentielles pour le bon fonctionnement de l'organisme, ainsi que pour le transport de substances.

3. La régulation de l'eau

L'eau ne pouvant être stockée, l'organisme doit continuellement réguler le volume grâce aux entrées et aux sorties.

Les entrées d'eau sont les liquides ingérés dans les boissons, les aliments surtout les fruits et légumes qui sont composés à 80% d'eau. La soif est un phénomène qui permet de réguler les entrées et elle est due à un manque d'eau au niveau extracellulaire. La soif étant relativement tardive il ne faut pas attendre d'avoir soif pour boire.

Les sorties d'eau sont les liquides éliminés par les urines, la transpiration et les pertes d'eau lors de la respiration. Ces sorties d'eau sont régulées par la température corporelle et par les reins. L'augmentation de la température corporelle stimule la transpiration, ce qui crée une pellicule d'eau à la surface de la peau dont l'évaporation permettra en retour de diminuer la température corporelle. Ce qui rend efficace la transpiration n'est pas sa simple production mais son évaporation, il ne faut donc pas essuyer la sueur. Par ce mécanisme régulateur, on peut maintenir un échange thermique supérieur au niveau de la peau. Le sang se refroidit avant de gagner les parties profondes du corps ce qui permettra d'éviter le phénomène de « surchauffe ». (57)

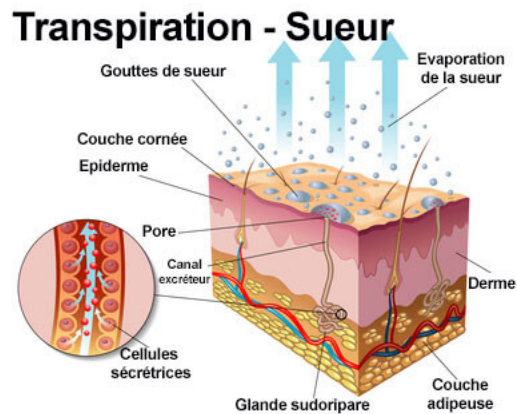


Figure 43 : Anatomie de la peau

A savoir que la transpiration est accrue quand il fait chaud, même en cas de déshydratation. En revanche, l'entraînement régulier intense en condition de forte chaleur permet à notre organisme d'apprendre à mieux transpirer et rend la transpiration plus efficace grâce à une sudation plus précoce et plus abondante. Ceci confère une meilleure tolérance à la chaleur au sportif qui s'entraîne pour le Grand Raid. Les reins eux, jouent un rôle dans le maintien du volume sanguin et dans la sécrétion des urines.

4. Les besoins en eau

Les besoins en eau varient beaucoup en fonction des conditions atmosphériques, de l'activité effectuée et des vêtements portés. Un sédentaire dans des conditions normales a besoin d'1,5 Litre d'eau par jour. Tandis qu'un coureur du Grand Raid, en atmosphère chaude et humide, aura une transpiration importante ce qui entrainera des besoins accrus en eau qui peuvent aller jusqu'à 1 Litre d'eau par heure d'effort, que ce soit avant, pendant ou après la course. Les pertes hydriques en transpiration peuvent aller de 1,5 Litre à 3 Litres par heure.

Les besoins en eau de chaque coureur peuvent être mesurés afin de compenser les pertes de manière optimale. Idéalement, 80% du volume perdu devrait être restitué en cours d'activité, le reste se voyant fourni lors de la première heure de récupération. Afin de procéder à cette mesure, le coureur doit se peser avant d'effectuer une séance d'entraînement à la chaleur, ceci est le Poids Initial (Pi). Il renouvelle la procédure au retour pour déterminer le Poids Final (Pf). Il doit effectuer la différence et y ajouter le volume de liquide pris au cours de la séance (V) et cela donnera la perte totale consécutive à la séance (P) : $P = Pf - Pi + V$

Il devra calculer 80% de P et cela lui donnera la quantité d'eau à fournir lors de la prochaine sortie comparable. (57)

5. Conséquences de la déshydratation

La déshydratation est due à un déséquilibre entre entrée et sortie d'eau. Ce risque est réel quelles que soient les conditions atmosphériques mais est amplifiée lorsque les températures sont chaudes et humides. Si l'hydratation n'est pas suffisante, le volume d'eau contenu dans le sang diminue et celui-ci s'épaissit. L'apport d'oxygène et de nutriments aux muscles est donc diminué ainsi que l'élimination des toxines.

Les signes de la déshydratation qui devront alerter le sportif d'endurance sont : (58)

- Apparition de la soif, diminution des performances en endurance de 10%
- Soif plus intense, diminution des performances en endurance de 20%
- Bouche sèche, baisse de la sécrétion d'urine, baisse du volume sanguin et diminution des performances de 30%
- Diminution des capacités physiques de 40%
- Diminution des capacités cérébrales telle qu'une baisse de la concentration, la survenue de céphalées et des troubles du comportement
- Baisse des capacités de régulation de la température corporelle, apparition d'une tachycardie
- Risque d'apparition d'un état de choc.

Tout cela conduira à une diminution des performances avec une baisse de la VO_{2max} et de la capacité d'endurance. De plus, une déshydratation, même minime, majore le risque de pathologies telles que blessures musculaires, tendinopathies et troubles digestifs.

6. Le Coca-Cola

Les sodas et notamment le Coca-Cola sont largement représentés sur les stands de ravitaillement du Grand Raid. En revanche, ils ne peuvent être considérés comme des boissons adaptées à la pratique sportive d'endurance à cause de leur osmolarité hypertonique, de leur concentration trop élevée en glucides et leur forme gazeuse qui ne permettent pas une absorption optimale durant un effort. Nous verrons le risque de l'ingestion d'une boisson hypertonique juste après. De plus, leur faible teneur en sodium ne leur permet pas de participer à la réhydratation du coureur, ce qui n'en fait pas une boisson « de l'effort ». Un litre de Coca contient seulement 40 milligrammes de sodium, ce qui est insuffisant pour compenser les pertes survenant pendant un ultra-trail comme le Grand Raid.

La teneur en sucre est en effet trop élevée et peut perturber le fonctionnement du tube digestif et entraîner des diarrhées, un phénomène de déshydratation et des troubles gastriques dus à l'extrême acidité de ce produit.

De plus, la présence de l'acide phosphorique, gaz de nature acidifiante, et la température trop basse à laquelle on l'ingère accroissent le risque de troubles digestifs. (57)

7. Les boissons « de l'effort »

Lors d'un effort intense et par forte chaleur, il est préférable de consommer des boissons de l'effort plutôt que de l'eau pure qui sera moins riche en minéraux, et notamment en sodium, ce qui pourrait conduire à une hyponatrémie (nous le reverrons dans le paragraphe suivant). Les boissons de l'effort apportent simultanément de l'eau, du sodium et des glucides, ce qui en fait la boisson de référence pour les traileurs. Il faut en revanche faire la différence entre les boissons énergétiques et les boissons énergisantes. Ces dernières sont composées de ginseng, taurine, caféine, sont difficiles à digérer et n'apportent aucune preuve scientifique pour prouver leur intérêt pour le sportif d'endurance.

Les critères de choix des boissons à l'effort sont :

- L'osmolarité puisque la boisson de l'effort doit être isotonique voire hypotonique mais surtout pas hypertonique. Sachant qu'une solution isotonique a la même concentration que le sang, elle sera facilement absorbée et quittera rapidement l'estomac pour une efficacité optimale et un confort digestif certain. Une solution hypertonique tardera à quitter l'estomac au risque de diminuer son efficacité et de créer des troubles digestifs et pouvant même favoriser la déshydratation par appel d'eau au niveau de l'estomac pour diluer cette boisson trop concentrée.

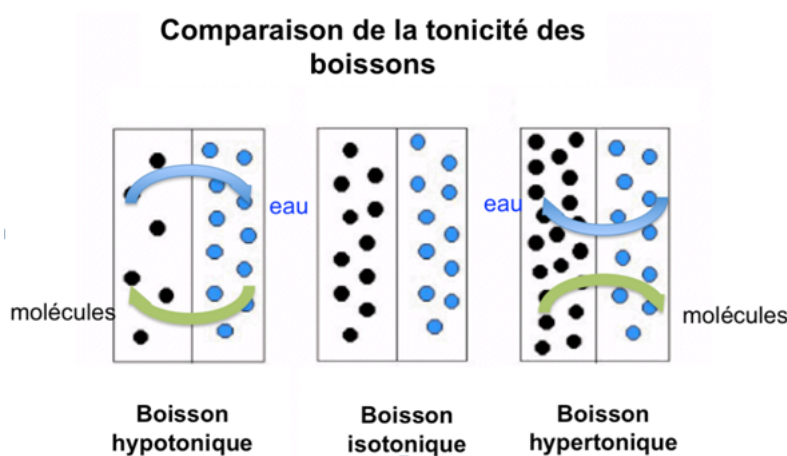


Figure 44 : Comparaison de la tonicité des boissons à l'effort

- La teneur en glucides idéale pour une boisson de l'effort se situe entre 60 et 80 grammes de glucides par litre.
- La qualité des glucides qui doivent avoir un index glycémique élevé. Certaines boissons associent plusieurs types de glucides ce qui permet d'augmenter la quantité de glucides exogènes utilisés à l'effort. L'idéal reste d'associer du glucose ou des maltodextrines et du fructose car le fructose utilise une voie de pénétration intracellulaire différente de celle du glucose ce qui favorise l'absorption. Les polymères tels que les maltodextrines sont plutôt recommandés pour éviter l'écœurement puisqu'ils ont une absence de saveur

sucrée. Attention à ne pas utiliser trop de fructose car celui-ci pourrait entraîner des diarrhées.

- La teneur en électrolytes qui est de 500 à 700 milligrammes de sodium par litre d'eau. Elle peut être plus pour des épreuves de longue durée comme le Grand Raid mais sans dépasser 1 gramme par litre.
- Le pH qui doit dépasser les 5,5.
- Le goût qui joue un rôle fondamental puisqu'une boisson de saveur agréable sera plus consommée par le coureur. D'où l'avantage d'utiliser des boissons à base de maltodextrines qui ont un goût plus neutre et moins écœurant au long terme.
- Des protéines peuvent être présentes dans la boisson de l'effort avec un dosage de 1 gramme de protéine pour 4 grammes de glucides.
- Des vitamines peuvent aussi être ajoutées, principalement la vitamine B1 qui favorise l'utilisation du glucose et de la vitamine C.

Les boissons à l'effort sont la priorité pour le coureur d'endurance, mais la quantité à absorber ne peut être standardisée puisque chacun peut digérer plus ou moins de liquide et transpire plus ou moins. En revanche chaque coureur doit s'abreuver toutes les 15 minutes pendant l'effort qu'il ait soif ou non. A température chaude et humide, il faut privilégier une température de boisson plus fraîche, moins riche en glucides et plus riche en sodium pour boire plus et compenser les pertes dues à la transpiration abondante sans avoir de troubles digestifs.

8. L'hyponatrémie induite par l'exercice

L'hyponatrémie induite par l'exercice, ou « intoxication à l'eau », est une anomalie liée aux perturbations des échanges minéraux et aux pertes hydro-minérales lors de marathon ou d'ultra-marathon. Celle-ci survient en situation de surcharge hydrique lors de l'effort, caractérisée par une ingestion excessive d'eau pure ou non riche en sodium couplée à d'abondantes pertes hydriques.(59)

L'association entre une consommation excessive d'eau et une hyponatrémie liée à l'exercice a été reconnue pour la première fois en 1981 chez un coureur participant au « marathon des camarades » en Afrique du Sud. (60) Elle est définie comme un taux de sodium plasmatique inférieur ou égal à 135 mmol/Litre. (61) Depuis, le problème ne cesse de se multiplier, et les sujets à risque qui ont été identifiés ne sont pas les coureurs d'élite, mais les individus moyens accomplissant l'effort à faible vitesse. Ils boivent généralement à chaque ravitaillement, un verre ou plus, d'eau ou de coca qui sont des boissons faibles en sodium, et ils n'éliminent pas assez vu leur faible vitesse. Ils se retrouvent donc en surcharge hydrique. (16)

Cette forme d'intoxication à l'eau s'accompagne de plusieurs signes cliniques parfois inquiétants tels que malaise, perte de connaissance, voire coma.

En temps normal, tout excédant de liquide bu donne lieu à une diurèse compensatoire permettant de maintenir les teneurs des différents solutés.

A l'effort, cette régulation n'est plus possible puisque l'organisme met en œuvre des mécanismes hormonaux afin de conserver l'eau et éviter la déshydratation, ce qui entraîne une augmentation du volume plasmatique.

La prévalence de l'hyponatrémie dépend de plusieurs facteurs, dont l'entraînement du coureur et la zone dans laquelle se déroule la course. Certaines études montrent que dans des températures ambiantes atteignant les 40°C sa prévalence peut être de 40%, comme elle peut être de 8% dans un ultra-trail en Suisse avec des températures basses.(60)

L'entraînement permet de diminuer la prévalence de l'hyponatrémie car l'athlète devra mettre en place une stratégie d'hydratation au préalable afin d'avoir une connaissance sur ses propres besoins en boisson. Il devra également s'entraîner dans des conditions de températures similaires à celles de la course puisqu'il est prouvé qu'une adaptation à la chaleur permet au corps de mieux réguler sa température, d'éviter les surchauffes et donc de limiter une hydratation excessive. Quatre jours d'acclimatation à la chaleur à court terme facilitent des adaptations corporelles pour les coureurs qui ne sont pas habitués. Les pauses durant les courses sont également importantes pour réguler la température du corps.

En revanche les traileurs doivent être conscients que des conditions météorologiques extrêmes comme sur le Grand Raid peuvent entraîner une surconsommation de liquide. Mais il faut bien noter que s'ils boivent à volonté sans provoquer une surcharge liquidienne, aucune hyponatrémie ne se développera.

VII. L'alimentation autour de la pratique sportive

Les athlètes participant à des sports d'ultra-endurance doivent gérer les problèmes nutritionnels, en particulier en ce qui concerne l'équilibre énergétique et hydrique. Une course d'ultra-endurance tel que le Grand Raid, pourrait entraîner un déficit énergétique considérable. Un tel bilan énergétique négatif est une préoccupation majeure pour la santé et les performances car il entraîne une diminution de la masse grasse et du muscle squelettique lors d'évènements comparables. L'anémie sportive provoquée par des exercices intenses et une gêne gastro-intestinale, dans des environnements chauds ou froids, doit également être considérée comme un facteur majeur de santé et de performance dans les sports d'ultra-endurance. En outre, les pertes de liquide dues à la transpiration peuvent atteindre jusqu'à deux litres par heure en raison de l'augmentation du travail métabolique lors d'exercices prolongés dans des environnements chauds, ce qui pourra entraîner une déshydratation. Pour éviter de se déshydrater, certains athlètes consommeront plus de liquides qu'il n'en faut et encourront un risque accru d'hyponatrémie liée à l'exercice et de gonflement des membres.

Cette dernière décennie, les recherches dans le domaine de la nutrition sportive se sont accumulées et démontrent désormais le rôle déterminant de la disponibilité en macro et micronutriments dans la régulation des voies de signalisation cellulaire censées réguler l'adaptation des muscles squelettiques et améliorer les performances à l'exercice.

Lors d'une activité sportive, le taux d'ADP/ATP augmente puisqu'il a dégradation de l'ATP en ADP+Pi. Ensuite l'ADP peut reformer de l'ATP en donnant un phosphate inorganique (Pi) à une autre molécule d'ADP : $2ADP \Rightarrow ATP + AMP$. Au cours de la contraction musculaire, plus l'AMP est formé, plus le rapport AMP/ATP augmente, ce qui entraîne une augmentation de la phosphorylation de l'AMPK. Une fois phosphorylée, l'AMPK, protéine kinase activée par l'AMP, devient active. Celle-ci à plusieurs rôles dans la régulation du métabolisme énergétique :

- Elle va phosphoryler et inhiber son substrat en aval, l'acétyl-CoA carboxylase ce qui entrainera une diminution des niveaux de manonyl-CoA. Ceci permet l'activation du transporteur des acides gras mitochondrial le Carnitine Palmitoyltransferase I permettant un plus grand flux d'acides gras dans la mitochondrie pour l'oxydation.
- Elle va également phosphoryler et inhiber les protéines Rab-GAP ce qui permet à d'avantage de Rab d'être dans l'état lié au guanosine triphosphate (GTP) et augmente la translocation du GLUT4 vers la membrane plasmique augmentant ainsi l'absorption et l'oxydation du glucose.

Le concept de nutrition périodisée et individualisée récemment développé a été défini comme « utilisation prévue, ciblée et stratégique d'interventions nutritionnelles spécifiques pour améliorer les adaptations ciblées par des séances d'exercices ou des plans d'entraînement périodiques, ou pour obtenir d'autres effets qui amélioreront les performances à long terme. » (17) Cette définition de l'entraînement nutritionnel ne se limite pas aux adaptations du muscle mais pourrait concerner les adaptations de tous les organes. Ce concept est utilisé pour décrire les modifications de l'apport nutritionnel en réponse à certaines périodes d'entraînement.

Plusieurs méthodes de nutrition ont été testé et sont encore utilisées de nos jours par les athlètes d'endurance. Les principales sont la méthode « low train » qui consiste à consommer une faible quantité de glucide pendant l'entraînement et qui rejoint le régime cétogène, la méthode « training high » qui consiste à consommer de fortes quantités de glucides et la méthode qui alterne ces deux modes.

Il n'y a aucune des méthodes qui répondra à tous les besoins d'un individu, elle dépendra des objectifs spécifiques de l'athlète pour une course donnée. Par conséquent, l'application pratique appropriée réside dans la combinaison optimale de différentes méthodes d'entraînement nutritionnel. C'est ce que nous allons voir dans les parties suivantes.

A. Pendant l'entraînement et repas pré-compétitif

Une alimentation équilibrée en macronutriments et micronutriments est la base pour tout sportif.

Comparé aux sports d'endurance qui reposent principalement sur le métabolisme des glucides, les courses d'ultra-endurance étant prolongées et d'intensité modérée à forte présentent une demande accrue d'apport en matière grasse. Ceci peut aussi s'expliquer par la quantité de graisse plus importante que de glucides pouvant être stocké dans le corps humain.

Jusqu'à peu, un régime cétogène sur plusieurs mois était préconisé pour les athlètes préparant une course d'ultra endurance puisqu'il avait été démontré dans les années 20 que la réduction de l'apport en glucides et l'augmentation de l'apport en graisses entraînaient des taux plus élevés d'oxydation des graisses. Mais une étude plus tardive a également montré que cet apport pouvait réduire les activités des enzymes liées au métabolisme des glucides. Il se pouvait donc que l'oxydation des graisses augmentent en raison de l'incapacité à utiliser les glucides. (17) Sur le long terme cette stratégie pouvait perturber l'immunité, diminuer la capacité à oxyder des glucides exogènes pendant la course ainsi qu'augmenter l'oxydation des protéines musculaires.

Les glucides étant des substrats importants pour les exercices de haute intensité, de telles adaptations seraient indésirables pour les coureurs du Grand Raid qui ont tout de même des périodes d'intensité élevée lors des montées et qui ont donc besoin d'avoir des réserves importantes en glycogène pour pouvoir poursuivre la course jusqu'au bout. Le régime proposé va se dérouler en deux étapes et devra être testé durant la période d'entraînement pour prouver son efficacité avant d'être appliqué pour la course importante. Chaque individu étant unique, le régime devra être adapté en fonction des variabilités individuelles du traileur.

Dans la première partie, un nouveau régime est présenté dans une étude très récente datant d'octobre 2018 (62) il s'agit du régime « Fat adapt ». Celui-ci doit débiter une dizaine de jours avant la course. Il s'agit d'un régime développé comme stratégie nutritionnelle avant la course pour augmenter l'oxydation des acides gras, atténuer l'épuisement du glycogène et ainsi améliorer les performances. Cette stratégie inclue un apport élevé en matières grasses de 60 à 70% et un apport faible en glucides de 15 à 20% mais seulement sur quelques jours et non plusieurs mois ce qui ne laisserait pas le temps de modifier les enzymes du métabolisme des glucides. L'activité sportive doit être maintenue et doit rester suffisamment intense afin de mobiliser le glycogène. La diminution de la consommation de glucides couplée à la poursuite de l'entraînement va permettre de créer une appétence majorée des muscles aux glucides et d'augmenter la mise en réserve ultérieure grâce au phénomène de surcompensation.

Physiologiquement, une disponibilité réduite en glucose entraîne une augmentation de l'activité de l'AMPK, ce qui augmentera l'absorption du glucose comme nous avons pu le voir précédemment.

Les études ont également montré que la capacité d'un exercice prolongé d'intensité modérée à forte était associée aux réserves de glycogène musculaire pré-exercice.

Dans un deuxième temps, un régime consistant à recharger les réserves en glycogène sera adopté les deux derniers jours. Le dernier protocole qui a fait ses preuves est un protocole modifié du fameux régime dissocié scandinave qui dure 36 à 48 heures avant l'évènement au lieu de huit jours. Celui-ci consiste à consommer beaucoup plus de glucides (8 grammes de glucides par kilogrammes et par jour) afin de recharger les réserves en glycogène dans les muscles et le foie grâce au phénomène de surcompensation. Lors de cette période, il semblerait que les aliments à index glycémique bas soient plus favorables à la performance car ils favorisent l'utilisation des lipides et épargne le glycogène musculaire.

Ce protocole permet d'atteindre jusqu'à 140% de la normale des réserves en glycogène s'il y a eu déplétion glycogénique les jours précédents. Lors de cette période de « recharge glycogénique », toute activité physique est proscrite.

Ce protocole donne des résultats similaires aux protocoles plus anciens qui consistaient à remplir les réserves de glycogène sur 6 à 8 jours, ceci en entraînant moins de stress pour l'athlète. Les réserves de glycogène seraient maximales et l'athlète pourrait maintenir le rythme au cours de la dernière période de la course.

Les fruits et légumes jouent un rôle important pendant la période d'entraînement de par leur richesse en minéraux, vitamines, eau, antioxydants, leur index-glycémique bas et leur pouvoir alcalinisant. En revanche il faut limiter leur consommation les trois derniers jours car leur richesse en fibres peut trop accélérer le transit.

Il est important que la nutrition pendant l'entraînement soit la même que celle qui sera adopté pendant la course afin de vérifier que le coureur supporte bien le régime qui lui est attribué.

Le dernier repas avant la course devra être pris trois heures avant le départ afin que celui-ci ai le temps d'être digéré. Si le délai entre le repas et le début de la course est court, les aliments pourront être mixés afin de faciliter la digestion.

Les aliments devront être sélectionnés afin d'éviter au maximum des troubles digestifs qui pourront pénaliser le coureur. La consommation de fibres et de lipides devra être évité afin de limiter le risque de diarrhées qui sera déjà augmenté dû au stress pré-compétitif. Il s'agira d'un repas principalement glucidique et protéique.

La priorité sera donnée aux aliments qui ont un temps de séjour gastrique le plus court possible comme le riz, les pâtes, les œufs et le poisson cuit.

L'hydratation devra être optimale avant l'épreuve pour ne pas partir avec un handicap et diminuer le risque de crampes.

La ration d'attente correspond aux trois dernières heures précédant le départ de la course. Le but est de maintenir la glycémie au meilleur niveau et de maintenir l'hydratation tout en évitant l'hypoglycémie réactionnelle.

Le stress précédant la compétition couplée à l'ingestion d'aliments à index glycémique élevé risque de provoquer une hyperglycémie suivie d'une sécrétion importante d'insuline.

Cette insulinémie élevée et l'effort physique peuvent entraîner une hypoglycémie réactionnelle en début d'effort qui aurait des conséquences dramatiques sur les performances de l'athlète. C'est pourquoi il est recommandé d'éviter les aliments à index glycémique élevé juste avant la course.

La ration d'attente peut se composer de jus de fruits ou d'une compote en fonction de la préférence du coureur. L'idéal est d'apporter entre 40 et 50 grammes de glucides lors des trois dernières heures en les ingérant par petites quantités.

B. Pendant l'activité sportive

Le premier élément le plus important est l'eau puisque le risque de déshydratation sur le Grand Raid est accru. Il faut boire entre 150 et 200 millilitres d'une boisson énergétique toutes les 15 minutes sans attendre d'avoir soif. Si le coureur a soif entre temps il pourra boire de l'eau simple.

La boisson énergétique doit être isotonique pour une meilleure absorption comme nous l'avons vu précédemment et doit être consommée entre 5 et 15°C. Sa teneur en glucides sera de 60 à 80 grammes par litre. Les glucides utilisés devront être préférentiellement un mélange de maltodextrines et de fructose afin d'augmenter la quantité de glucides exogènes utilisés à l'effort puisque ces deux molécules n'utilisent pas les mêmes voies de pénétration intracellulaire.

La teneur en sodium sera de 500 à 700 milligrammes par litre d'eau.

Et un ajout de BCAA de 1 à 2 grammes par heure peut être fait. Le principal BCAA utilisé est la Leucine et a un effet sur les performances physiques de l'athlète en permettant aux muscles de limiter l'utilisation des stocks glycogéniques musculaires en favorisant leur oxydation mais également d'avoir un effet positif sur le mental en combattant la fatigue mentale qui peut survenir durant l'ultra-trail.

L'alimentation pendant la course doit se faire toutes les 45 minutes environ. Ces encas doivent être principalement composés de féculents non irritant. La patate douce est très souvent consommée sur le Grand Raid car elle possède un index glycémique bas, et est sans gluten donc ne crée pas d'inflammation.

Une pause avec un repas plus consistant est conseillée toutes les 4 à 5 heures d'effort d'affilé.

Suite à un effort intense, comme une montée de col lors du Grand Raid, le coureur pourra consommer des glucides pour permettre de recharger les stocks de glycogène des fibres musculaires ayant travaillés intensément et se trouvant partiellement au repos. Les glucides consommés à ce moment-là pourront être sous forme de boissons énergétiques ou d'aliments solides comme les barres ou gels énergétiques en fonction des préférences du coureur puisque leur absorption est quasiment similaire. Les gels doivent être consommés avec de l'eau car ils sont trop concentrés et peuvent créer des troubles digestifs.

La consommation de glucides pendant la course doit être de 50 à 80 grammes par heure tout en faisant attention à la survenue de troubles digestifs. Le coureur devra avoir testé sa résistance lors de ses périodes d'entraînement afin de connaître ses limites et trouver le meilleur compromis.

C. La récupération

La période de récupération permet à l'organisme de récupérer après l'effort intense de l'ultra-trail. Elle est fondamentale pour la performance physique de l'athlète et dépend de la qualité de la ration de récupération.

Pendant cette période, l'alimentation a un rôle fondamental puisqu'elle va aider à la récupération musculaire. Une étude prouve que consommer des glucides associés à des protéines permet de favoriser le stockage du glycogène et réduire les dommages musculaires et de ce fait, améliorer les performances de l'athlète lors de la prochaine course. (63) Cette consommation devra avoir lieu dans les heures qui suivent l'effort, pendant la période qu'on appelle « la fenêtre métabolique » puisque c'est à ce moment que les récepteurs musculaires au glucose sont plus nombreux et que leur sensibilité est améliorée. Le nombre d'enzymes nécessaires à la reconstitution du stock de glycogène musculaire est aussi augmentée durant cette fenêtre.

Le protocole préconise un apport de 1gramme de glucides à index glycémique élevé par kilogramme par heure toutes les deux heures pendant quatre à six heures.

Le protocole préconise un apport de protides équivalent à un quart du poids des glucides.

Une bonne réhydratation avec un apport d'eau, de magnésium et de sodium sera essentielle pour une bonne récupération puisque l'activité sportive intense engendre transpiration et perte d'eau. La période de récupération permettra de restituer un volume sanguin idéal pour une bonne circulation sanguine, de rééquilibrer le pH à l'aide de boissons riches en bicarbonates ainsi que de compenser les attaques radicalaires qui ont eu lieu durant l'effort intense.

Si le sportif suit ces recommandations, il sera dans des conditions optimales pour ses prochaines performances sportives et pourra même dépasser son timing.

VIII. Cas de comptoir d'un trailer.

A. Troubles digestifs

Les troubles digestifs concernent 50% des sportifs dont la majorité sont des sportifs d'endurance. Lors des courses d'ultra-trail, ces troubles causent la plupart des abandons et on parle même « d'épidémie de troubles digestifs ». Notre système digestif étant considéré comme notre second cerveau, il nécessite une attention particulière dans ce genre de pratique. (64)

Les différents troubles digestifs principalement retrouvés sont les diarrhées, les crampes d'estomac, les nausées, le reflux gastro-œsophagien, les saignements et les ballonnements.

Les causes de ces troubles sont nombreuses :

- L'ischémie-reperfusion qui est un processus d'adaptation circulatoire instantané et qui contribue à la majorité des problèmes digestifs.
- Les facteurs mécaniques comme les ondes de choc et les vibrations ajoutent leur contribution à ces troubles.
- La déshydratation
- La perméabilité intestinale
- L'hyperconcentration de la prise alimentaire notamment en glucides
- La prise d'un repas précompétitif trop copieux, trop riche ou ayant un délai trop court entre la prise et le début de l'épreuve.

Quelques conseils à donner au sportif d'endurance afin d'éviter au maximum la venue de ces troubles digestifs :

- Éviter la prise d'anti-inflammatoire avant et pendant la course.
- Ne pas partir en surrégime puisque tout effort mal géré s'accompagne d'une restriction brutale de l'irrigation des intestins
- Éviter la consommation d'aliments riches en fibres irritantes, en fonction de la sensibilité de chacun. Cette variabilité individuelle dépend de la bonne santé de l'écosystème digestif.
- Éviter la consommation de café ou de boissons à base de caféine qui accélère le transit.
- Boire dès le début de l'effort à intervalles réguliers.
- S'abstenir de boire des boissons hypertonique avant ou pendant la course.
- Diluer davantage ses boissons en cas de forte chaleur puisque dans ces circonstances l'irrigation des intestins est encore plus diminuée.
- Respecter un délai suffisant entre la fin du repas qui précède la course et le début de celle-ci. Ce délai est de trois heures et peut être adapté en fonction des contraintes de l'activité et de la température extérieure.

Le phénomène « d'ischémie-reperfusion » se déroule en deux temps. Sur ce schéma, l'épaisseur des traits est proportionnelle à l'irrigation assurant l'oxygénation des différents territoires anatomiques mentionnés.

On observe qu'au repos aucun problème ne se pose chez un sujet sain, tandis qu'à l'effort, l'afflux de sang augmente très nettement au niveau des muscles.(64) Ceci représente le premier temps, « l'ischémie ». Et lorsque l'effort est couplé à une forte chaleur, l'irrigation cutanée augmente elle aussi. L'irrigation des intestins est donc mise de côté, et chute d'environ 20% de sa valeur de repos.(65)

Les conséquences de ce phénomène d'ischémie sont multiples, on retrouve tout d'abord une diminution de l'absorption des glucides apportés pendant l'activité, une chute brutale d'oxygènes aux cellules de l'intestin ainsi qu'une atteinte tissulaire locale engendrant des saignements dans les selles. Selon une étude, 85% des participants à un ultra-trail présentent des traces de sang dans leurs selles à l'arrivée. (66)

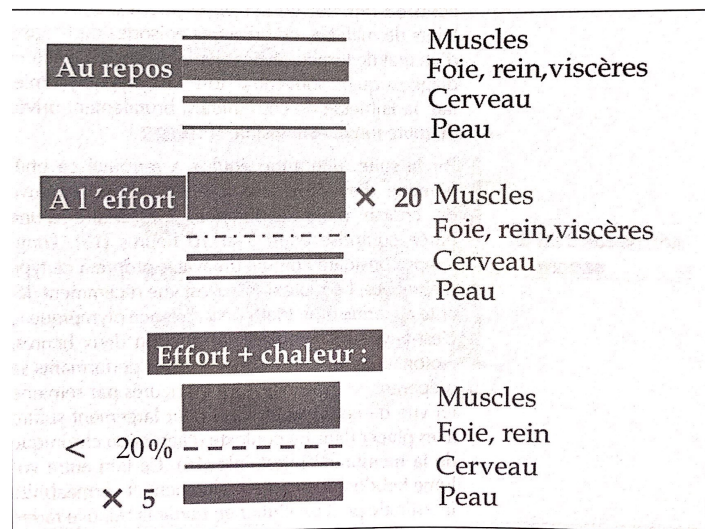


Figure 45 : Adaptations circulatoires à l'effort

La « reperfusion » signifie un retour à une irrigation normale et peut avoir un délai variable de l'ordre de quelques minutes ou quelques heures. Cette variabilité dépend de plusieurs choses comme le degré de déshydratation du coureur, le stress thermique enduré, la nature de l'activité mais aussi le caractère individuel.

Lorsque le débit viscéral se restaure, on retrouve une augmentation brutale de l'apport d'oxygène aux tissus ce qui conduit à une forte augmentation de la production de radicaux libres. En revanche les intestins n'augmentent pas leur activité enzymatique anti-oxydante. Ces attaques vont concerner les entérocytes et les jonctions serrées, ce qui va conduire à une perte d'étanchéité de la muqueuse intestinale et engendrer une perturbation de l'écosystème.

On peut donc supplémenter le coureur en antioxydant afin de réduire l'importance de ces atteintes. (16)

La perméabilité intestinale est un autre facteur aggravant des troubles digestifs des coureurs d'endurance. Ce phénomène survient après la redistribution sanguine dont nous avons parlé juste au-dessus, suite à la production de radicaux libres durant l'effort, aux agressions mécaniques mais aussi à la prise isolée ou chronique d'anti-inflammatoire par voie orale. Ces perturbateurs vont endommager les jonctions serrées qui sont les éléments clés de l'étanchéité intestinale. En temps normal, ces structures laissent passer qu'une petite quantité de macromolécules. Lors de perturbations, la perméabilité intestinale peut augmenter et atteindre des niveaux anormalement élevés, ce qui laissera passer des éléments de la lumière intestinale vers la circulation sanguine. Selon leur poids et leur structure, ces molécules peuvent devenir des antigènes et auront des conséquences pathologiques dans certains cas ou alors seront anodines dans d'autres cas.(16)

Les manifestations dépendront de la répétition des épisodes d'agression tissulaire, des phénotypes mais également du statut nutritionnel puisque les mécanismes de protection, de réparation et de mise en jeu du métabolisme énergétique dépendent de l'apport de nutriments à des taux appropriés. Les acides gras essentiels sont particulièrement impliqués ici dans la réparation de la membrane intestinale.

B. Dopage volontaire ou involontaire

Depuis toujours, l'Homme a cherché à améliorer ses performances physiques par des moyens artificiels. A partir du moment où le sportif utilise des substances interdites pour améliorer ses performances on parle de dopage.



Figure 46 : Le dopage

On peut se doper volontairement pour augmenter ses performances physiques en ayant toute sa conscience, mais on peut également consommer un complément alimentaire en ignorant ses vrais composants. Ceci arrive le plus souvent lorsque l'athlète consomme un complément commandé sur internet, ou ramené de l'étranger par un ami ou connaissance.

Quoi qu'il en soit, qu'il soit volontaire ou pas, si l'athlète se fait contrôler positif au test antidopage, il sera disqualifié.

Les stéroïdes sont les substances qui viennent le plus souvent à l'esprit quand on parle de dopage, mais bien d'autres substances sont utilisées par les sportifs. (67)

Une plante chinoise a fait l'objet de plusieurs cas de dopage involontaire, il s'agit de la « Ma Huang ». Elle est consommée comme stimulant ou coupe faim mais c'est en réalité de l'éphédrine en chinois, et chaque comprimé peut en contenir jusqu'à 800 milligrammes. Sur la composition on retrouve le nom « d'éphédra » qui est le composé principal de l'éphédrine mais que beaucoup de personnes ignorent. L'éphédrine fait partie des nouvelles substances inscrites dans la liste des produits interdits en compétition. Sur le plan international, le seuil de positivité est défini pour une concentration urinaire de 10 microgrammes par millilitre.

De nombreux médicaments en vente libre pour les pathologies ORL contiennent de l'éphédrine ou de la pseudo-éphédrine et nécessite donc une attention particulière. Sachant que le corps n'en produit pas naturellement, il n'y a aucune tolérance lorsqu'un athlète est contrôlé positif à l'éphédrine.

Voici la liste des substances interdites pendant les entraînements et les compétitions :

- Les agents anabolisants :
 - Les stéroïdes anabolisants androgènes exogènes tel que le Méténolone
 - Les stéroïdes anabolisants androgènes endogènes par administration exogène tel que l'Androstènediol
 - Les autres agents anabolisants tel que le Tibolone
- Les bêta-2 agonistes sélectifs et non-sélectifs :
Petites exceptions pour le salbutamol inhalé qui ne doit pas dépasser 1600 microgrammes par 24 heures, pour le formotérol inhalé qui ne doit pas dépasser les 54 microgrammes par 24 heures et pour le salmétérol inhalé qui ne doit pas dépasser 200 microgrammes par 24 heures.
- Les modulateurs hormonaux et métaboliques :
 - Les inhibiteurs d'aromatase tel que l'anastrozole
 - Les modulateurs sélectifs des récepteurs aux oestrogènes tel que le tamoxifène
 - Les autres substances anti-oestrogéniques tel que le clomifène
 - Les modulateurs métaboliques tel que les insulines
 - Les agents prévenant l'activation du récepteur IIB de l'activine
- Les diurétiques et les agents masquants tel que la desmopressine.
- Les hormones de croissances, les hormones peptiques et substances apparentées :
 - L'EPO et agents affectants l'érythropoïèse
 - Les hormones peptidiques et leurs facteurs de libération
 - Les facteurs de croissance et leurs modulateurs

- Les stimulants : à l'exception de la caféine, de la nicotine, de la phényléphrine, du bupropion, de la phénylpropanolamine, du pipradrol et de la synéphrine qui figurent dans le programme de surveillance 2019 mais ne sont pas interdites. L'éphédrine et le méthyléphédrine sont interdits si leurs concentrations dans l'urine dépassent 10 microgrammes par millilitre. La pseudoéphédrine est interdite si sa concentration urinaire dépasse les 150 microgrammes par millilitre.
- Les narcotiques tel que la buprénorphine
- Les cannabinoïdes naturels et synthétiques
- Les glucocorticoïdes tel que le budésônide.

IX. Conclusion

Le Grand Raid figure parmi les ultra-trails les plus durs au monde. Chaque traileur qui se respecte connaît cette « diagonale des fous » et beaucoup, venus du monde entier, viennent à la Réunion pour y participer et tenter de franchir la ligne d'arrivée.

L'ultra-trail est un sport qui se développe de plus en plus depuis une dizaine d'années, et les participants ne cessent de dépasser leurs limites physiologiques et mentales pour y parvenir.

Comme nous l'avons vu, un bon entraînement associé à une alimentation et hydratation optimale permettent aux traileurs d'augmenter leurs performances et d'avoir des adaptations physiologiques insoupçonnées. Le corps humain est une « machine » qui étonnera toujours...

En revanche le régime adopté par l'athlète devra être adapté en fonction de son métabolisme, des périodes d'entraînements et de l'environnement dans lequel il pratiquera ses entraînements. De nouvelles études prônant chacune des régimes différents sortent régulièrement, il est donc compliqué pour les coureurs de faire le tri et de trouver celui qui sera le plus adapté pour lui et le plus efficace. Il devra surtout essayer le régime bien à l'avance afin d'arriver confiant le jour de la compétition.

La confiance est importante pour le coureur car le mental à une place clé pendant cette si longue épreuve qui peut durer de 23h pour le premier à 66h pour le dernier. De plus, l'ambiance sympathique pendant la course ainsi qu'aux points de ravitaillement va aussi jouer un rôle. On observe également un « booster naturel » à la levée du jour pour les participants, qui ont un regain d'énergie après la nuit.

Mais une chose est sûre, nous ne sommes pas tous égaux face aux adaptations physiologiques... Tout d'abord, il existe des « extraterrestres » comme le fameux Kilian Jornet qui est à analyser de plus près... Et deuxièmement, certaines études prouvent que les femmes, juste avant leurs menstruations, auraient une affinité accrue pour l'oxydation des lipides ce qui permettrait de protéger les réserves en glycogène et donc seraient « plus endurantes » que les hommes... à creuser.

X. Bibliographie :

1. L'origine des Ultra-Trails [Internet]. LeMinimaliste. [cité 1 avr 2019]. Disponible sur: <https://leminimaliste.info/lorigine-des-ultra-trails/>
2. Diagonale des Fous - Trail de Bourbon - Mascareignes - Zembrocal Trail - La diagonale des fous [Internet]. [cité 1 avr 2019]. Disponible sur: <http://www.grandraid-reunion.com/?lang=en>
3. Archipels. Les 20 ans du grand Raid, une course exceptionnelle - La diagonale des Fous à La Réunion - Archipels [Internet]. [cité 1 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=n-p-iGWDvfe>
4. Lemon PW, Mullin JP. Effect of initial muscle glycogen levels on protein catabolism during exercise. *J Appl Physiol*. avr 1980;48(4):624-9.
5. Turrens JF. Mitochondrial formation of reactive oxygen species. *J Physiol*. 15 oct 2003;552(Pt 2):335-44.
6. Brooks. IMPORTANCE OF THE 'CROSSOVER' CONCEPT IN EXERCISE METABOLISM [Internet]. 1997 [cité 22 févr 2019]. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1440-1681.1997.tb02712.x?sid=nlm%3Apubmed>
7. Frank Netter - Atlas d'anatomie humaine [Internet]. [cité 22 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.elsevier-masson.fr/frank-netter-atlas-anatomie-humaine>
8. Beaver WL, Wasserman K, Whipp BJ. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. juin 1986;60(6):2020-7.
9. Wasserman K. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. - PubMed - NCBI [Internet]. 1973 [cité 22 févr 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4723033>
10. Wasserman K, Whipp BJ. Exercise physiology in health and disease. *Am Rev Respir Dis*. août 1975;112(2):219-49.
11. Meyer T, Lucía A, Earnest CP, Kindermann W. A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters--theory and application. *Int J Sports Med*. févr 2005;26 Suppl 1:S38-48.
12. Hill AV, Lupton H. Muscular Exercise, Lactic Acid, and the Supply and Utilization of Oxygen. *QJM Int J Med*. 1 janv 1923;os-16(62):135-71.
13. Howley ET, Bassett DR, Welch HG. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. *Med Sci Sports Exerc*. sept 1995;27(9):1292-301.
14. Courbe de barcroft [Internet]. [cité 22 mai 2019]. Disponible sur: http://campus.cerimes.fr/reanimation-medicale/enseignement/reamed_1/site/html/1_13_131_1.html
15. Chaui-Berlinck JG, Monteiro LHA. Frank-Starling mechanism and short-term adjustment of cardiac flow. *J Exp Biol*. 1 déc 2017;220(23):4391-8.
16. Riché MD. Micronutrition, santé et performance: Comprendre ce qu'est vraiment la micronutrition. *De Boeck Supérieur*; 2008. 386 p.
17. Jeukendrup AE. Periodized Nutrition for Athletes. *Sports Med Auckl Nz*. 2017;47(Suppl 1):51-63.
18. Mondazzi L, Arcelli E. Glycemic index in sport nutrition. *J Am Coll Nutr*. août 2009;28 Suppl:455S-463S.
19. O'Reilly J, Wong SHS, Chen Y. Glycaemic index, glycaemic load and exercise performance. *Sports Med Auckl NZ*. 1 janv 2010;40(1):27-39.
20. Le foie, organe régulateur de la glycémie [Internet]. [cité 2 avr 2019]. Disponible sur: http://ressources.unisciel.fr/DAEU-biologie/P2/co/P2_chap1_c2.html
21. Dossier : nutrition et performance sportive | INSEP [Internet]. [cité 2 avr 2019].

Disponible sur: <https://www.insep.fr/fr/actualites/dossier-nutrition-et-performance-sportive>

22. Kim J, Park J, Lim K. Nutrition Supplements to Stimulate Lipolysis: A Review in Relation to Endurance Exercise Capacity. *J Nutr Sci Vitaminol (Tokyo)*. 2016;62(3):141-61.
23. Gerasimos V. Grivas. The Role of L-Carnitine in Distance Athletes [Internet]. ResearchGate. 2018 [cité 12 mars 2019]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/329881441_The_Role_of_L-Carnitine_in_Distance_Athletes
24. Wagenmakers AJM. L-Carnitine Supplementation and Performance in Man. *Adv Nutr Top Sport*. 1991;32:110-27.
25. BJORNTOP P, SJÖSTRÖM L. Carbohydrate storage in man: Speculations and some quantitative considerations - ScienceDirect [Internet]. 1978 [cité 13 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0026049578800043>
26. Costill DL, Coyle E, Dalsky G, Evans W, Fink W, Hoopes D. Effects of elevated plasma FFA and insulin on muscle glycogen usage during exercise. *J Appl Physiol*. oct 1977;43(4):695-9.
27. Levi B, Werman MJ. Long-term fructose consumption accelerates glycation and several age-related variables in male rats. *J Nutr*. sept 1998;128(9):1442-9.
28. NEUFER P, COSTILL D. Improvements in exercise performance: effects of carbohydrate feedings and diet. - PubMed - NCBI [Internet]. 1987 [cité 13 mars 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3571097>
29. Ruderman NB. Muscle amino acid metabolism and gluconeogenesis. *Annu Rev Med*. 1975;26:245-58.
30. Friedman JE, Lemon PW. Effect of chronic endurance exercise on retention of dietary protein. *Int J Sports Med*. avr 1989;10(2):118-23.
31. GONTZEA I, SUTZESCU R. The Influence of adaptation to physical effort on nitrogen balance in man [Internet]. ResearchGate. 1975 [cité 4 avr 2019]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/9618120_Influence_of_adaptation_to_effort_on_nitrogen_balance_in_man
32. Le déroulement d'une consultation - IEDM [Internet]. [cité 19 mars 2019]. Disponible sur: <http://www.iedm.asso.fr/Le-deroulement-d-une-consultation>
33. Questionnaires et dosages biologiques - IEDM [Internet]. [cité 19 mars 2019]. Disponible sur: <http://www.iedm.asso.fr/Questionnaires-et-dosages>
34. Sreepriya M, Bali G. Chemopreventive effects of embelin and curcumin against N-nitrosodiethylamine/phenobarbital-induced hepatocarcinogenesis in Wistar rats. *Fitoterapia*. sept 2005;76(6):549-55.
35. Srivastava KC. Effects of dipyridamole, nifedipine, verapamil, hydralazine and propranolol on the formation of prostacyclin and thromboxane in a coupled system of platelets and aorta. *Prostaglandins Leukot Med*. juill 1986;23(1):31-6.
36. Venkatraman JT, Pendergast DR. Effect of dietary intake on immune function in athletes. *Sports Med Auckl NZ*. 2002;32(5):323-37.
37. Ryan MJ, Zimmerman BG. Effect of prostaglandin precursors, dihomo- γ -linolenic acid and arachidonic acid on the vasoconstrictor response to norepinephrine in the dog paw. *Prostaglandins*. 10 mai 1974;6(3):179-92.
38. Pendergast DR, Leddy JJ, Venkatraman JT. A perspective on fat intake in athletes. *J Am Coll Nutr*. juin 2000;19(3):345-50.
39. Collection des « Echos de la Micronutrition » - IEDM [Internet]. [cité 5 avr 2019]. Disponible sur: <http://www.iedm.asso.fr/Collection-des-Echos-de-la>
40. Simopoulos AP. Omega-3 fatty acids in health and disease and in growth and development. *Am J Clin Nutr*. sept 1991;54(3):438-63.
41. Riche D. Les déficits en magnésium et le sport. *Sci Sports*. 1 mars 1989;4(1):41-52.

42. Lukaski HC, Bolonchuk WW, Klevay LM, Milne DB, Sandstead HH. Maximal oxygen consumption as related to magnesium, copper, and zinc nutriture. *Am J Clin Nutr.* mars 1983;37(3):407-15.
43. Franz KB, Rüdell H, Todd GL, Dorheim TA, Buell JC, Eliot RS. Physiologic changes during a marathon, with special reference to magnesium. *J Am Coll Nutr.* 1 janv 1985;4(2):187-94.
44. Tobian L. THE JEREMIAH METZGER LECTURE HIGH POTASSIUM DIETS STRONGLY PROTECT AGAINST STROKE DEATHS AND RENAL DISEASE: A POSSIBLE LEGACY FROM PREHISTORIC MAN. 1986;18.
45. Cook JD, Lipschitz DA, Miles LE, Finch CA. Serum ferritin as a measure of iron stores in normal subjects. *Am J Clin Nutr.* juill 1974;27(7):681-7.
46. Prasad AS, Schulert AR, Sandstead HH, Miale A, Farid Z. Zinc, iron, and nitrogen content of sweat in normal and deficient subjects. *J Lab Clin Med.* juill 1963;62:84-9.
47. Nachtigall D, Nielsen P, Fischer R, Engelhardt R, Gabbe EE. Iron deficiency in distance runners. A reinvestigation using Fe-labelling and non-invasive liver iron quantification. *Int J Sports Med.* oct 1996;17(7):473-9.
48. Campos MS, Varela G, Minullo A. The effect of oxalate on calcium absorption in growing goats. *Proc Nutr Soc.* déc 1974;33(3):86A-87A.
49. Chu JY, Margen S, Costa FM. Studies in calcium metabolism. II. Effects of low calcium and variable protein intake on human calcium metabolism. *Am J Clin Nutr.* sept 1975;28(9):1028-35.
50. DRAPER HH. The Aboriginal Eskimo Diet in Modern Perspective | Request PDF [Internet]. ResearchGate. 1977 [cité 5 avr 2019]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/227679143_The_Aboriginal_Eskimo_Diet_in_Modern_Perspective
51. Alfthan G, Aro A, Arvilommi H, Huttunen JK. Selenium metabolism and platelet glutathione peroxidase activity in healthy Finnish men: effects of selenium yeast, selenite, and selenate. *Am J Clin Nutr.* janv 1991;53(1):120-5.
52. Benton D, Cook R. The impact of selenium supplementation on mood. *Biol Psychiatry.* 1 juin 1991;29(11):1092-8.
53. Thorn J, Robertson J, Buss DH, Bunton NG. Trace nutrients. Selenium in British food. *Br J Nutr.* mars 1978;39(2):391-6.
54. Micheletti A, Rossi R, Rufini S. Zinc status in athletes: relation to diet and exercise. *Sports Med Auckl NZ.* 2001;31(8):577-82.
55. Microbiote intestinale (flore intestinale) [Internet]. Inserm - La science pour la santé. [cité 9 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/microbiote-intestinal-flore-intestinale>
56. Les effets indésirables insoupçonnés des probiotiques - Sciences et Avenir [Internet]. [cité 8 mai 2019]. Disponible sur: https://www.sciencesetavenir.fr/sante/les-effets-indesirables-insoupconnes-des-probiotiques_127408
57. RICHE D. L'alimentation du sportif en 80 questions [Internet]. 2015 [cité 16 avr 2019]. Disponible sur: https://www.unitheque.com/Livre/vigot/L_alimentation_du_sportif_en_80_questions-77546.html
58. Déshydratation [Internet]. [cité 16 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/assure/sante/urgence/pathologies/deshydratation>
59. Chlíbková D, Knechtle B, Rosemann T, Žáková A, Tomášková I. The prevalence of exercise-associated hyponatremia in 24-hour ultra-mountain bikers, 24-hour ultra-runners and multi-stage ultra-mountain bikers in the Czech Republic. *J Int Soc Sports Nutr.* 10 févr 2014;11:3.

60. BEAT KNECHTLE; PANTELIS T. NIKOLAIDIS. Physiology and Pathophysiology in Ultra-Marathon Running [Internet]. 2018 [cité 17 avr 2019]. Disponible sur: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5992463/>
61. McGreal K, Budhiraja P, Jain N, Yu ASL. Current Challenges in the Evaluation and Management of Hyponatremia. *Kidney Dis.* juin 2016;2(2):56-63.
62. Nikolaidis PT, Veniamakis E, Rosemann T, Knechtle B. Nutrition in Ultra-Endurance: State of the Art. *Nutrients.* 16 déc 2018;10(12).
63. Ivy JL, Goforth HW, Damon BM, McCauley TR, Parsons EC, Price TB. Early postexercise muscle glycogen recovery is enhanced with a carbohydrate-protein supplement. *J Appl Physiol Bethesda Md* 1985. oct 2002;93(4):1337-44.
64. Brouns F, Beckers E. Is the gut an athletic organ? Digestion, absorption and exercise. *Sports Med Auckl NZ.* avr 1993;15(4):242-57.
65. Rehrer NJ, Smets A, Reynaert H, Goes E, De Meirleir K. Effect of exercise on portal vein blood flow in man. *Med Sci Sports Exerc.* sept 2001;33(9):1533-7.
66. Baska RS, Moses FM, Graeber G, Kearney G. Gastrointestinal bleeding during an ultramarathon. *Dig Dis Sci.* févr 1990;35(2):276-9.
67. Le Dopage et son Histoire | Dopage du Sportif [Internet]. IRBMS. 2016 [cité 20 mai 2019]. Disponible sur: <https://www.irbms.com/histoire-dopage/>

SERMENT DE GALIEN

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

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

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

De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine.

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

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

Que je sois couverte d'opprobre et méprisée de mes confrères si j'y manque.



RESUME :

Le Grand Raid est un ultra-trail de 165 kilomètres qui se déroule à l'île de la Réunion. Les ultra-trails, ou sports d'ultra-endurance, sont en expansion depuis une dizaine d'années et la préparation à ce type d'épreuve est très spécifique. Les sportifs doivent avoir une hygiène de vie irréprochable durant la préparation et la récupération afin de pouvoir performer durant l'épreuve et d'éviter de se blesser durant la période d'entraînement ou l'épreuve même. Le corps humain va s'adapter en fonction de l'entraînement et du régime nutritionnel adopté par le coureur pendant la période précédant la course. Les adaptations vont varier d'un coureur à l'autre en fonction des caractéristiques individuelles.

Au niveau physiologique, les fonctions cardiaques, pulmonaires et musculaires vont être particulièrement modifiées grâce à l'entraînement afin que le coureur devienne de plus en plus endurant.

L'énergie nécessaire au sportif provient des lipides, des glucides et des protéines et toute la chaîne de production va se dérouler dans la mitochondrie.

En revanche, en endurance, et surtout en ultra-endurance, le but du coureur va être d'utiliser au maximum les lipides comme source d'énergie afin de conserver son stock en glycogène pour durer dans l'épreuve. L'entraînement va engendrer cette adaptation et permettra à l'athlète de puiser de plus en plus dans ses réserves de lipides et d'économiser son glycogène. On pourra voir un déplacement vers la droite du « crossover point » sur la courbe qui lie l'utilisation des lipides et glucides à l'effort en fonction du VO_2 max. Le VO_2 max étant la quantité maximale d'oxygène qu'un individu peut utiliser par unité de temps.

Un régime spécifique adapté à chaque coureur est nécessaire afin de combler les déficits de chacun en micronutriments et de donner les bonnes rations de macronutriments pour optimiser la mise en réserve et ensuite la production d'énergie pendant l'épreuve. Les stocks de glycogène peuvent être augmentés suite à un régime pauvre en glucose puis enrichi en glucose qui se déroulera sur quelques jours avant la course. L'athlète devra donc trouver le régime qui lui correspond pendant sa période d'entraînement, pour l'appliquer ensuite durant l'épreuve afin d'optimiser ses performances et d'éviter les blessures.

DISCIPLINE :

Sport et nutrition

MOTS-CLES :

Nutrition

Micronutrition

Physiologie

Ultra-trail

Ultra-marathon

INTITULE DE L'UFR :

UFR pharmacie de Bordeaux