

L'ultra-trail en haute altitude

Mélanie Ringeval

▶ **To cite this version:**

Mélanie Ringeval. L'ultra-trail en haute altitude. Sciences pharmaceutiques. 2019. dumas-02294125

HAL Id: dumas-02294125
https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02294125

Submitted on 23 Sep 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.

THESE

PRESENTEE ET PUBLIQUEMENT SOUTENUE DEVANT LA FACULTE DE PHARMACIE DE MARSEILLE

Le 12 septembre 2019

PAR

Mademoiselle RINGEVAL Mélanie
Née le 24 juin 1992 à Cayenne (Guyane française)

EN VUE D'OBTENIR

LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

TITRE :

L'ULTRA-TRAIL EN HAUTE ALTITUDE.

JURY :

Président : Madame DI GIORGIO Carole
Membres : Madame RIMET-GASPARINI Odile et Madame DUPRE Maryse

Université d'Aix-Marseille – Faculté de Pharmacie – 27 bd Jean Moulin – CS 30064 - 13385 Marseille cedex 05 – France
Tél. : +33 (0)4 91 83 55 00 - Fax : +33 (0)4 91 80 26 12

THESE

PRESENTEE ET PUBLIQUEMENT SOUTENUE DEVANT LA FACULTE DE PHARMACIE DE MARSEILLE

Le 12 septembre 2019

PAR

Mademoiselle RINGEVAL Mélanie
Née le 24 juin 1992 à Cayenne (Guyane française)

EN VUE D'OBTENIR

LE DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN PHARMACIE

TITRE :

L'ULTRA-TRAIL EN HAUTE ALTITUDE.

JURY :

Président : Madame DI GIORGIO Carole
Membres : Madame RIMET-GASPARINI Odile et Madame DUPRE Maryse

Faculté de Pharmacie
Aix*Marseille Université

27 Boulevard Jean Moulin – 13385 MARSEILLE Cedex 05
Tel. : 04 91 83 55 00 – Fax : 04 91 80 26 12

ADMINISTRATION :

Doyen :	Mme Françoise DIGNAT-GEORGE
Vice-Doyens :	M. Jean-Paul BORG, M. François DEVRED, M. Pascal RATHELOT
Chargés de Mission :	Mme Pascale BARBIER, M. David BERGE-LEFRANC, Mme Manon CARRE, Mme Caroline DUCROS, Mme Frédérique GRIMALDI
Conseiller du Doyen :	M. Patrice VANELLE
Doyens honoraires :	M. Jacques REYNAUD, M. Pierre TIMON-DAVID, M. Patrice VANELLE
Professeurs émérites :	M. José SAMPOL, M. Athanassios ILIADIS, M. Jean-Pierre REYNIER, M. Henri PORTUGAL
Professeurs honoraires :	M. Guy BALANSARD, M. Yves BARRA, Mme Claudette BRIAND, M. Jacques CATALIN, Mme Andrée CREMIEUX, M. Aimé CREVAT, M. Bernard CRISTAU, M. Gérard DUMENI, M. Alain DURAND, Mme Danielle GARÇON, M. Maurice JALFRE, M. Joseph JOACHIM, M. Maurice LANZA, M. José MALDONADO, M. Patrick REGLI, M. Jean- Claude SARI
Chef des Services Administratifs :	Mme Florence GAUREL
Chef de Cabinet :	Mme Aurélie BELENGUER
Responsable de la Scolarité :	Mme Nathalie BESNARD

DEPARTEMENT BIO-INGENIERIE PHARMACEUTIQUE

Responsable : Professeur Philippe PICCERELLE

PROFESSEURS

BIOPHYSIQUE	M. Vincent PEYROT
	M. Hervé KOVACIC
GENIE GENETIQUE ET BIOINGENIERIE	M. Christophe DUBOIS
HARMACIE GALENIQUE, PHARMACOTECHNIE INDUSTRIELLE, BIOPHARMACIE ET COSMETIQUE	M. Philippe PICCERELLE

MAITRES DE CONFERENCES

BIOPHYSIQUE	M. Robert GILLI
	Mme Odile RIMET-GASPARINI
	Mme Pascale BARBIER
	M. François DEVRED
	Mme Manon CARRE
	M. Gilles BREUZARD
	Mme Alessandra PAGANO
GENIE GENETIQUE ET BIOTECHNOLOGIE	M. Eric SEREE-PACHA
	Mme Véronique REY-BOURGAREL
PHARMACIE GALENIQUE, PHARMACOTECHNIE INDUSTRIELLE, BIOPHARMACIE ET COSMETOLOGIE	M. Pascal PRINDERRE
	M. Emmanuel CAUTURE
	Mme Véronique ANDRIEU
	Mme Marie-Pierre SAVELLI
NUTRITION ET DIETETIQUE	M. Léopold TCHIAKPE

A.H.U.

THERAPIE CELLULAIRE	M. Jérémy MAGALON

ENSEIGNANTS CONTRACTUELS

ANGLAIS	Mme Angélique GOODWIN

DEPARTEMENT BIOLOGIE PHARMACEUTIQUE
Responsable : Professeur Philippe CHARPIOT

PROFESSEURS

BIOCHIMIE FONDAMENTALE, MOLECULAIRE ET CLINIQUE

M. Philippe CHARPIOT

BIOLOGIE CELLULAIRE — M. Jean-Paul BORG

HEMATOLOGIE ET IMMUNOLOGIE — Mme Françoise DIGNAT-GEORGE

Mme Laurence CAMOIN-JAU

Mme Florence SABATIER-MALATERRE — Mme Nathalie BARDIN

MICROBIOLOGIE M. Jean-Marc ROLAIN — M. Philippe COLSON

PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE MEDICALE, HYGIENE ET ZOOLOGIE

Mme Nadine AZAS-KREDER

MAITRES DE CONFERENCES

BIOCHIMIE FONDAMENTALE, MOLECULAIRE ET CLINIQUE

Mme Dominique JOURDHEUIL-RAHMANI
M. Thierry AUGIER
M. Edouard LAMY
Mme Alexandrine BERTAUD
Mme Claire CERINI
Mme Edwige TELLIER
M. Stéphane POITEVIN

HEMATOLOGIE ET IMMUNOLOGIE — Mme Aurélie LEROYER
M. Romaric LACROIX
Mme Sylvie COINTE

MICROBIOLOGIE — Mme Michèle LAGET
M. Michel DE MEO
Mme Anne DAVIN-REGLI
Mme Véronique ROUX
M. Fadi BITTAR
Mme Isabelle PAGNIER

	Mme Sophie EDOUARD
	M. Seydina Mouhamadou DIENE
PARASITOLOGIE ET MYCOLOGIE MEDICALE, HYGIENE ET ZOOLOGIE	
	Mme Carole DI GIORGIO
	M. Aurélien DUMETRE
	Mme Magali CASANOVA
	Mme Anita COHEN
BIOLOGIE CELLULAIRE	Mme Anne-Catherine LOUHMEAU

A.H.U.

HEMATOLOGIE ET IMMUNOLOGIE	M. Maxime LOYENS

DEPARTEMENT CHIMIE PHARMACEUTIQUE
Responsable : Professeur Patrice VANELLE

PROFESSEURS

CHIMIE ANALYTIQUE, QUALITOLOGIE ET NUTRITION
Mme Catherine BADENS

CHIMIE PHYSIQUE – PREVENTION DES RISQUES ET NUISANCES TECHNOLOGIQUES
M. Philippe GALLICE

CHIMIE MINERALE ET STRUCTURALE – CHIMIE THERAPEUTIQUE
M. Pascal RATHELOT
M. Maxime CROZET

CHIMIE ORGANIQUE PHARMACEUTIQUE M. Patrice VANELLE
M. Thierry TERME

PHARMACOGNOSIE, ETHNOPHARMACOLOGIE, HOMEOPATHIE
Mme Evelyne OLLIVIER

MAITRES DE CONFERENCES

BOTANIQUE ET CRYPTOGAMIE, BIOLOGIE CELLULAIRE
Mme Anne FAVEL
Mme Joëlle MOULIN-TRAFFORT

CHIMIE ANALYTIQUE, QUALITOLOGIE ET NUTRITION
M. Alain NICOLAY
Mme Estelle WOLFF
Mme Elise LOMBARD
Mme Camille DESGROUAS

CHIMIE PHYSIQUE – PREVENTION DES RISQUES ET NUISANCES TECHNOLOGIQUES
M. David BERGE-LEFRANC
M. Pierre REBOUILLON

CHIMIE THERAPEUTIQUE Mme Sandrine FRANCO-ALIBERT
Mme Caroline DUCROS

M. Marc MONTANA

Mme Manon ROCHE

CHIMIE ORGANIQUE PHARMACEUTIQUE HYDROLOGIE

M. Armand GELLIS

M. Christophe CURTI

Mme Julie BROGGI

M. Nicolas PRIMAS

M. Cédric SPITZ

M. Sébastien REDON

PHARMACOGNOSIE, ETHNOPHARMACOLOGIE, HOMEOPATHIE

M. Riad ELIAS

Mme Valérie MAHIOU-LEDDET

Mme Sok Siya BUN

Mme Béatrice BAGHDIKIAN

MAITRES DE CONFERENCE ASSOCIES A TEMPS PARTIEL (M.A.S.T.)

CHIMIE ANALYTIQUE, QUALITOLOGIE ET NUTRITION

Mme Anne-Marie PENET-LOREC

CHIMIE PHYSIQUE – PREVENTION DES RISQUES ET NUISANCES TECHNOLOGIQUES

M. Cyril PUJOL

DROIT ET ECONOMIE DE LA PHARMACIE M. Marc LAMBERT

GESTION PHARMACEUTIQUE, PHARMACOECONOMIE
ET ETHIQUE PHARMACEUTIQUE OFFICINALE, DROIT ET COMMUNICATION
PHARMACEUTIQUES A L'OFFICINE ET GESTION DE LA PHARMAFAC

Mme Félicia FERRERA

A.H.U.

CHIMIE ANALYTIQUE, QUALITOLOGIE ET NUTRITION

M. Mathieu CERINO

ATER

CHIMIE ANALYTIQUE	M. Charles DESMARCHELIER
CHIMIE THERAPEUTIQUE	Mme Fanny MATHIAS

DEPARTEMENT MEDICAMENT ET SECURITE SANITAIRE

Responsable : Professeur Benjamin GUILLET

PROFESSEURS

PHARMACIE CLINIQUE	Mme Diane BRAGUER
	M. Stéphane HONORÉ
PHARMACODYNAMIE	M. Benjamin GUILLET
TOXICOLOGIE GENERALE	M. Bruno LACARELLE
TOXICOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT	Mme Frédérique GRIMALDI

MAITRES DE CONFERENCES

PHARMACODYNAMIE	M. Guillaume HACHE
	Mme Ahlem BOUHLEL
	M. Philippe GARRIGUE
PHYSIOLOGIE	Mme Sylviane LORTET
	Mme Emmanuelle MANOS-SAMPOL
TOXICOCINETIQUE ET PHARMACOCINETIQUE	M. Joseph CICCOLINI
	Mme Raphaëlle FANCIULLINO
	Mme Florence GATTACECCA
TOXICOLOGIE GENERALE ET PHARMACIE CLINIQUE	M. Pierre-Henri VILLARD
	Mme Caroline SOLAS-CHESNEAU
	Mme Marie-Anne ESTEVE

A.H.U.

PHARMACIE CLINIQUE	M. Florian CORREARD
PHARMACOCINETIQUE	Mme Nadège NEANT

CHARGES D'ENSEIGNEMENT A LA FACULTE

Mme Valérie AMIRAT-COMBRALIER, Pharmacien-Praticien hospitalier

M. Pierre BERTAULT-PERES, Pharmacien-Praticien hospitalier

Mme Marie-Hélène BERTOCCHIO, Pharmacien-Praticien hospitalier

Mme Martine BUES-CHARBIT, Pharmacien-Praticien hospitalier

M. Nicolas COSTE, Pharmacien-Praticien hospitalier

Mme Sophie GENSOLLEN, Pharmacien-Praticien hospitalier

M. Sylvain GONNET, Pharmacien titulaire

Mme Florence LEANDRO, Pharmacien adjoint

M. Stéphane PICHON, Pharmacien titulaire

M. Patrick REGGIO, Pharmacien conseil, DRSM de l'Assurance Maladie

Mme Clémence TABELE, Pharmacien-Praticien attaché

Mme TONNEAU-PFUG, Pharmacien adjoint

M. Badr Eddine TEHHANI, Pharmacien – Praticien hospitalier

M. Joël VELLOZZI, Expert-Comptable

Mise à jour le 22 février 2018

Remerciements

Je tiens à exprimer ici mes sincères remerciements à tous ceux qui ont été présents durant ces 8 années de pharmacie à la faculté de Marseille et à ceux qui ont contribué à la réalisation de cette thèse :

A ma directrice de thèse, Madame DI GIORGIO Carole, je vous remercie de m'avoir encadré pour cette thèse. Merci pour l'intérêt et la confiance que vous m'avez porté durant ma formation, votre disponibilité et vos conseils. Veuillez trouver en cette thèse, l'expression de ma sincère reconnaissance et le témoignage de mon profond respect.

A Monsieur KOVACIC Hervé je vous remercie pour votre patience, votre disponibilité et d'avoir consacré une partie de votre temps afin de m'aider sur toute ma partie statistique. Vous ne pouviez pas être présent aujourd'hui mais merci de m'avoir dirigé vers Madame Odile RIMET qui représentera toute la partie statistique.

Merci Madame RIMET Odile de me faire l'honneur de juger ce travail en siégeant à mon jury de thèse, Il était important pour moi de pouvoir présenter ce travail à une personne qui se dévoue entièrement à la formation officinale et qui se consacre à ses étudiants sans compter ses heures. Je vous prie de bien vouloir accepter ma respectueuse reconnaissance.

A Madame DUPRE Maryse, je te remercie de me faire l'honneur de faire partie de mon jury de thèse. A toutes nos étapes partagées au Népal, à nos discussions le soir, à tous les Chaï Latte, les nuits dans les lodges, tes snickers et ta mésothérapie qui a sauvé ma cheville. Directement impliqué dans ce sujet et cette expérience, tu n'as pas hésité à me répondre positivement à mon invitation, il me semblait évident que tu fasses partie de mon jury. Au futur pour l'Himale Race. Soit assuré de ma sincère gratitude et de mon profond respect.

A ma famille,

A ma mère qui m'a toujours soutenue, sa tolérance face à mes différents choix, d'avoir pris soin de moi, sa patience immense, son amour, ces heures de discussions à la maison, au téléphone, de m'écouter et pour avoir toujours tout mis en place pour mon bonheur et me faciliter les choses durant ces 27 années. Sache que je suis admirative de ta force et de tout ce que tu as pu donner de ta personne pour chaque étape de ma vie.

A mon père, qui m'a transmis cette passion pour la nature, la montagne et les valeurs qui vont avec depuis toute petite et qui m'ont amené à ce sujet de thèse. Cet intérêt qui grandit un peu plus chaque année pour la montagne et tout ce qui l'entoure, l'altitude, les voyages, le sport, se dépasser, découvrir, assumer… Ce dernier voyage/course au Népal passé ensemble était incomparable à tout ce qu'on a pu faire, comme tu l'as dit le dernier soir à Katmandou « Je n'ai pas attendu ce voyage pour être fière de ma fille, mais aujourd'hui je lui dis, je suis très fière d'elle et je souhaite à chaque père d'un jour avoir la chance de partager cela avec sa fille », sache que c'est réciproque, je suis fière d'être ta fille et de partager tous ces moments incroyables avec toi. Merci pour ton amour, ce que tu m'apportes et m'avoir permis de vivre tout cela.

A ma petite sœur, ça n'a pas été facile chaque année mais aujourd'hui c'est le bonheur. Chaque année tu me surprends et m'ouvres un peu plus les yeux sur tout ce qui nous entoure. Ton implication, ta sensibilité, ta maturité et ta simplicité de prendre la vie comme elle vient est un réel exemple. A nos passions pour nos chiens.

A Olly, ma petite staffie qui était prêt de moi durant chaque heure passée sur cette thèse, nos balades dans les calanques, au boulodrome, à la plage et notre amour.

A Magali, nous ne sommes pas des expressifs sentimentales chez les Ringevaux mais sache que depuis que tu es rentrée dans nos vies, tu m'es un exemple de la force physique féminine. Je suis admirative et envieuse de ton courage et tout ce que tu as réalisé en course et fait aujourd'hui en alpinisme. Si aujourd'hui j'ai envie de faire des trail toujours plus long, repousser les limites et de partir en montagne c'est aussi beaucoup grâce à toi. A nos spritz et nos discussions, merci Magali de me faire partager ta passion, d'être présente et de jouer un rôle dans mon bonheur.

A mes amis,

Merci à tous les copains qui sont là depuis la 2ème année des études de pharmacie : Jessica, Anselme, Celia, Mathilde, Lisa, Val C, Arthur, Yann, Christophe, Cécilia, Cym, les vrais amis qui ont été là durant ces moments de bonheurs, joies, stress, difficultés, ennuyeux, étudiants, professionnelles, hiver, été, matin, soir, nuit, à la plage, à la montagne, à la campagne, à Marseille…

Un merci tout particulier à Christophe, mon binôme sans qui je n'aurais jamais validé certaines matières. Ce copain qui est toujours présent et à tout moment pour m'écouter, me conseiller, dont je suis fière et heureuse qu'il fasse partie de ma vie.

Un merci particulier aussi à Yann que je vois presque chaque jour et un peu plus chaque année, pour m'avoir fait découvrir tes passions, pour nos envies d'évasion, nos weekends, nos randonnées dans les calanques, ta patience, ton calme, ta générosité, ton temps et surtout ton amitié.

Aux copines avec qui tout n'a pas été simple mais aujourd'hui on est grande, on a trouvé un équilibre et ça n'est que du bonheur. Lisa, merci pour ta tolérance, ta confidence, ta présence cette année et de garder ma petite Olly temps en temps. Jess, même si nous n'avons jamais été binôme de TP, nous l'avons été pour le reste, de la 2ème année de pharmacie à notre jour de thèse, merci pour toute ces heures passées ensemble à la cité U, ces moments inoubliables qui ont marqués nos études et nos vies.

Merci à tous les copains que j'ai rencontré en cours d'années de pharmacie, Val D, Julien et June et nos sorties nocturnes, Yoan le fréjussien, Jex toujours là quand on ne s'y attend pas.

A ma copine Chloé qui fait son petit bout de chemin aujourd'hui mais que j'adore et qui a une place immense dans mon cœur.

A tout ceux qui sont passés dans ma vie durant ces années d'études. A toutes les personnes que j'ai rencontré à Pittsburgh pour mon stage de 5ème année. A tous les bretons que j'ai rencontré pendant mon stage de 6ème année et tout particulièrement Coco mon breton préféré.

A Paul avec qui on a passé ce col à 5200m, ces étapes à 42km, ces Happy hour et qui m'a accueilli à Chamonix avec une rando/sortie trail de qualité.

A Bruno Poirier qui a été le premier influenceur pour mon choix de sujet de thèse. Merci pour ta passion pour la montagne, ton partage, ta générosité, ton expérience qui est une grande richesse.

A tout ceux qui ont répondu au questionnaire pour l'enquête de ma thèse : Paul, Bruno P, Bruno R, Jules Henri, Sher, Bir, ChristopheL, Nour-eddine, Mimgma, Jagan, Jean louis, Maryse, Christine, Pascale, Lou, Antonin, Fanny et Christophe P. Merci de m'avoir fait confiance et pris un peu de votre temps pour bien répondre à chacune de mes questions.

« L'Université n'entend donner aucune approbation, ni improbation aux opinions émises dans les thèses. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs. »

Table des matières

1 ..... *1*

TABLE DES FIGURES *20*

TABLE DES TABLEAUX *21*

Introduction *22*

1. Définition de l'altitude et de l'ultra endurance. *24*

1.1. L'altitude **24**

1.2. L'Ultra trail **25**

1.3. Annapurna mandala trail (AMT) **26**

2. Physiologie de l'exercice *28*

2.1. Le muscle **28**

2.2. Les substrats énergétiques **31**

2.3. Les intermédiaires métaboliques **32**

2.4. Les filières de synthèse énergétique **33**

2.4.1. Le processus anaérobie alactique 33
2.4.2. Le processus anaérobie lactique 34
2.4.3. Le processus aérobie 34
2.4.4. Cas des exercices de très courte durée 36
2.4.5. Cas des exercices de courte-moyenne durée 37
2.4.6. Cas des exercices de longue durée 42

2.5. Adaptation cardiorespiratoire (11) **46**

2.6. Production de chaleur pendant l'effort (11). **46**

2.7. Adaptation endocrinienne (11) **47**

2.8. Les facteurs limitants de l'effort **48**

3. Les paramètres biologiques de l'effort *49*

3.1. La fréquence cardiaque **49**

3.2. Les seuils ventilatoires **49**

3.3. La consommation maximale d'oxygène : VO2 max **49**

3.4. Test d'évaluation des paramètres de l'effort **50**

4. Adaptation à l'altitude *51*

4.1. Composition de l'air **51**

4.2. Effet de l'altitude sur la pression atmosphérique **52**

4.3. Conséquences physiques sur les pressions, les concentrations en oxygène et en CO_2 dans l'organisme **54**

4.3.1. Pression alvéolaire 54
4.3.2. Pression partielle et concentration dans le sang 55

4.4. Conséquences physiologiques sur le fonctionnement de l'appareil respiratoire des personnes vivants en basse altitude **58**

4.4.1. Effets à court terme (1-3 jours) 58

4.4.2. Pathologies aigues liées à l'altitude. ... 62
4.4.3. Effets à moyen et long terme (2-3 jours à 3-4 semaines) ... 66

4.5. Les populations vivant en altitude ... 71

4.6. Prévention des pathologies aiguës de haute altitude. ... 73
4.6.1. Technique d'acclimatation. ... 73
4.6.2. Score du MAM ... 75

4.7. Traitements des pathologies aiguës de haute altitude ... 76
4.7.1. Traitements médicamenteux ... 78
4.7.2. Stratégie de mise en place ... 82

5. Les facteurs de performances de préparation et durant la course ... 85

5.1. Programme d'entrainement ... 85

5.2. Les facteurs de performance ... 93
5.2.1. La VO2max ... 94
5.2.2. L'endurance de faible intensité ... 95
5.2.3. La technique de course et de marche ... 96
5.2.4. La musculation ... 98
5.2.5. La tactique de course ... 100
5.2.6. Le cout énergétique ... 100
5.2.7. L'adaptation du corps à l'exercice ... 101
5.2.8. Le mental ... 104
5.2.9. Le sommeil ... 105
5.2.10. L'entrainement en haute altitude ... 107
5.2.11. L'alimentation ... 108

6. Enquête ... 115

6.1. Recueil des données ... 115

6.2. Analyse statistique ... 116

6.3. Résultats ... 116

CONCLUSION ... 130

BIBLIOGRAPHIE ... 132

ANNEXE ... 135

SERMENT DE GALIEN ... 139

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Illustration des 3 modes de contraction. 29
Figure 2 : contraction musculaire. 30
Figure 3 : La participation des différentes filières énergétiques. 33
Figure 4 : objectifs et propriétés des différentes filières énergétiques. 35
Figure 5 : mitochondrie : lieu de respiration cellulaire 1/matrice 2/mb externe 3/mb interne 4/espace inter membranaire 5/crête 6/protéine de la chaine respiratoire 35
Figure 6 : Implication des différents types de fibres musculaires. 36
Figure 7 : la glycogénolyse. 38
Figure 8 : glycogénolyse, glycolyse et production d'ATP. Schéma des 10 réactions successives qui permettent la formation de deux ions pyruvates en partant soit du glucose soit du glycogène 39
Figure 9 : Augmentation exponentielle de la concentration des ions lactates. Seuil lactique. 42
Figure 10 : cycle de krebs composé de 11 étape au sein de la mitochondrie. 43
Figure 11 : Résumé des étapes de la filière aérobie. 45
Figure 12 : Relation de Clausius-Clapeyron. 52
Figure 13 : variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude 53
Figure 14 : PO2 dans le sang, en fonction du temps de passage dans le capillaire, en fonction de la PAO2 (trait plein : hypoxie ; trait pointillé : normoxie) 54
Figure 15 : courbe de saturation de l'hémoglobine. 56
Figure 16 : variations de la saturation artérielle en oxygène en fonction de l'altitude, au repos et à l'exercice maximal (Richalet & Herry, Médecine de l'alpinisme, Paris, Masson, 1999. 56
Figure 17 : Pressions partielles en oxygène, de l'air inspiré aux tissus, au niveau de la mer et à 5500 m d'altitude. 57
Figure 18 : courbe de saturation de l'hémoglobine au niveau de la mer (courbe pleine) et à 3500m d'altitude (exemple la Paz) (courbe en pointillés) 60
Figure 19 : évolution des PO2 et PCO2 alvéolaires au cours du temps lors d'un séjour en altitude 67
Figure 20 : concentration plasmatique d'EPO et nombre d'erythrocytes lors d'un séjour en altitude ..... (4300 m). 67
Figure 21 : concentration sanguine en O2. 1) au niveau de la mer ; 2) après 2 jours à 4000 m ; 3) après 3 semaines à 4000 m. 68
Figure 22 : récapitulatif des principales adaptations de l'organisme face à l'hypoxie d'altitude. 71
Figure 23 : Caisson hyperbare CERTEC. 77
Figure 24 : Schéma décisionnel pour la prise en charge du mal aigu des montagnes. 83
Figure 25 : le cycle du sommeil. 105
Figure 26 : AMT 2019, nuit à Mu Gompa, 3900m d'altitude. 107

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : pression partielle d'O2 et équivalent en % d'oxygène en fonction de l'altitude. Source : Küpper et al. 2012 24
Tableau 2 : composants et composition gazeuse de l'air en %. 51
Tableau 3 : variation de la pression de vapeur saturante avec la température. 52
Tableau 4 : pressions et pressions partielles des principaux gaz en fonction de l'altitude. 53
Tableau 5 : les principales boucles de régulation intervenant dans la respiration 58
Tableau 6 : score du MAM. 76
Tableau 7 : les chiffres de la VO2max. Source : http://preventdisease.com/news/articles/vo2_max_how_fit_athlete.shtml 95

Introduction

Le trail est le terme le plus couramment utilisé pour désigner la course à pied en pleine nature. Le trail désigne également un type de compétition sportive, dont la définition et la règle varient en fonction des différentes fédérations ou associations qui régissent la discipline. L'athlète pratiquant ce sport est appelé traileur ou traileuse. La croissance exponentielle du nombre de pratiquants et d'épreuves au cours des deux dernières décennies nous interrogent sur les fondements sociaux de ce phénomène : est-il associé à une saturation pour la course sur route, à un besoin de nature ressenti dans nos sociétés occidentales toujours plus industrialisées, à un besoin de repousser ses limites, à une quête de sens, à un effet de mode ? Les causes potentielles sont multiples. La course en nature comme mode de locomotion nous ramène à l'évolution singulière de l'espèce humaine, qui chassait ses proies par épuisement il y a 200'000 ans grâce à d'exceptionnelles capacités d'endurance.

L'apparition d'épreuves de course de ce nouveau genre s'est accompagnée de la création d'une classification capable de rendre compte du niveau d'endurance requis pour chacune des épreuves. En 2013, une fédération internationale, l'International Trail Running Association (I.T.R.A) (1) a été créée et propose la classification suivante :

– Trail : Moins de 42 km
– Trail Ultra Medium (M) : 42 km à 69 km
– Trail Ultra Long (L) : 70 km à 99 km
– Trail Ultra X Long (XL) : plus de 100 km

Ces courses demandent une bonne connaissance de la physiologie musculaire afin de se préparer au mieux physiquement pour un effort endurant de longue durée faisant entrer en jeux la filière aérobie.

Le trail est devenu tendance, les courses en montagne se multiplient et, tout naturellement, l'altitude intéresse les coureurs. C'est alors que des courses à hautes altitudes se sont développées. La Hardroche Endurance Run 100 qui se déroule à une altitude moyenne de 3500m, la Skyrace avec un passage à 3100m ou encore des ultra-trail par étapes comme l'Annapurna Mandala Trail (AMT) qui sera pris comme exemple pour l'enquête de cette thèse avec son passage le plus haut sur le Larkee pass à 5106m.
L'AMT est choisi pour l'enquête de cette thèse parce qu'elle se déroule au Népal. Ce pays fascine de plus en plus par la beauté de ses paysages et leurs diversités : on y trouve des jungles avec sa faune et sa flore très spécifique, des forêts ainsi que la haute montagne avec des sommets allant à plus de 8000 mètres d'altitudes dont le plus haut sommet du monde, le mont Everest ou Sagarmatha en Népalais à 8848m, d'altitude. Au Népal, on n'y retourne pas uniquement pour le sport, l'hypoxie, l'épreuve, le défis, la nature, mais aussi pour la rencontre avec les habitants de ce pays, leur sagesse et leur culture. Ce pays est un terrain de jeu autant pour

les coureurs que pour les trekkeurs, les cyclistes, les grimpeurs, les alpinistes, les sportifs à la recherche de défis toujours plus impressionnants.

Une cinquantaine de cimes à plus de 7000 mètres d'altitude font partie de l'ensemble Annapurna avec le majestueux Machhapuchhare (6.993 m), sommet sacré et interdit. L'Himalaya est une terre d'aventure par excellence.

Ces ultra-trails en hautes altitudes font donc participer une nouvelle variable qui n'est pas présente lors du célèbre UTMB ou Tor des Géants ou encore la Diagonale des fous (grand raid de la Réunion), impressionnantes par leurs nombres de kilomètres parcourus et leur dénivelés cumulés (171km et 10000 mètres de D+ pour l'UTMB, 330km et 24000 mètres de D+ pour le Tor des Géants, 164km et 9917mètre de D+ pour la diagonale des fous) mais jamais à plus de 3000mètres d'altitude.
Lorsque l'altitude augmente, la pression atmosphérique diminue : elle est 2 fois moins élevée à 5000m et 3 fois moins élevée à 8000m qu'au niveau de la mer. L'oxygène devient aussi plus rare, on parle d'hypoxie, tout simplement parce qu'il y a moins d'air, sa densité diminue avec l'altitude avec toujours 21% d'Oxygène dans l'air ambiant. La conséquence est une diminution de la quantité d'oxygène que l'organisme sera capable de capter et de transporter dans le sang (on parle d'hypoxémie). Par exemple, au sommet du Mont Blanc, il n'y a plus que 50% de l'oxygène disponible au niveau de la mer, et pour l'Everest, ce chiffre tombe à 30%. La température chute elle aussi en altitude : elle baisse d'environ 1° tous les 150m.

Les effets physiologiques et les réponses physiopathologiques du corps humain sont différents selon le temps passé en altitude et à quelle altitude. Les effets physiologiques de l'altitude peuvent être séparés en trois zones, la haute altitude de 2 500 à 4 000 m, la très haute altitude de 4000 à 6000 m et l'altitude extrêmement élevée au-delà de 6 000 m. Les effets à court terme sont différents des effets à long terme. A long terme, une augmentation importante du nombre de globules rouges (hématocrite) permettant un transport de l'oxygène accru dans le sang est observé. Ceci est la conséquence d'un pic d'EPO dans les premiers jours d'exposition à l'hypoxie d'altitude.
Le séjour à une altitude élevée est donc susceptible de provoquer des affections directement liées au manque d'oxygène. À court terme, le mal aigu des montagnes se caractérise par divers symptômes de nature et de gravité très variable, allant de la céphalée jusqu'à des affections potentiellement mortelles comme l'œdème aigu du poumon ou l'œdème cérébral.
Cependant, ce qui est valable pour les touristes non habitués à l'altitude ne l'est pas forcement pour les populations vivant depuis des années en hautes altitude où une adaptation génétique est observable pour ces populations des Andes ou des hauts plateaux népalais et tibétains. Il est donc important pour les personnes vivant en basse altitude de suivre un protocole d'acclimatation ainsi qu'une préparation physique afin de ne pas subir les effets de l'altitude lors de ces courses

1. Définition de l'altitude et de l'ultra endurance.

1.1. L'altitude

L'altitude est définie par la distance verticale ou hauteur, au-dessus du niveau moyen de la mer, plan horizontal de référence. C'est donc l'élévation verticale qui influence de nombreux facteurs physiologiques et physiques tels qu'une modification de la pression atmosphérique, température, rayonnement solaire... et par conséquent, la distribution des espèces et de la biodiversité.

Parmi ces facteurs, la pression atmosphérique est une variation importante. Cette pression atmosphérique diminue avec la montée en altitude de façon exponentielle. Si la composition de l'air ne varie pas (le pourcentage en O2 reste stable à 20,93%), la pression partielle de l'oxygène elle va diminuer parallèlement à la diminution de la pression atmosphérique de sorte qu'au sommet de l'Everest (8848m) elle n'est plus qu'à un tiers de sa valeur au niveau de la mer. La pression artérielle en oxygène diminue donc, entrainant une hypoxie hypobare dans ces milieux naturels. Il existe par ailleurs des milieux non naturels (dont des milieux professionnels), où la pression partielle en oxygène va être diminuée de manière artificielle (volontairement ou non), sans modification de la pression atmosphérique. On parlera alors d'hypoxie normobare.

Altitude	$\%O_2$, conditions isobariques	Pression Atmosphérique		pO_2		Temps de conscience utile
[m]		[mm Hg]	[hPa]	[mm Hg]	[hPa]	
0	20.9	760.0	1013.2	158.8	211.7	Pas de limitation
500	19.7	716.0	954.6	149.6	199.5	
1000	18.5	673.8	898.3	140.8	187.7	
1500	17.4	634.0	845.3	132.5	176.7	
2000	16.4	596.0	794.6	124.6	166.1	
2500	15.4	560.0	746.6	117.0	156.0	
3000	14.5	525.8	701.0	109.9	146.5	
3500	13.6	493.0	657.3	103.0	137.3	
4000	12.7	462.0	616.0	96.6	128.8	
4500	11.9	432.6	576.8	90.4	120.5	
5000	11.1	404.8	539.7	84.6	112.8	
5500	10.4	378.6	504.8	79.1	105.5	>30 min.
6000	9.7	353.6	471.4	73.9	98.5	
6500	9.1	330.0	440.0	69.0	92.0	
7000	8.5	307.8	410.4	64.3	87.7	3-5 min.
10500	5.0	183.0	244.0	38.2	50.9	ca. 1 min.
12900	3.4	123.5	164.7	25.8	34.4	15-30 sec.

Tableau 1 : pression partielle d'O2 et équivalent en % d'oxygène en fonction de l'altitude. Source : Küpper et al. 2012

Un séjour en haute altitude est caractérisé par l'hypoxie, due à la diminution de la pression atmosphérique, le froid, l'exposition aux rayons ultraviolets et l'effort physique. C'est aux environs de 2500 m que les auteurs établissent la limite entre « haute » et « basse » altitude. C'est en effet au-delà de ce seuil fixé par Baker (1978) (2) que sont enregistrés des signes évidents de stress hypoxique ; signes d'autant plus nets que l'altitude augmente.

Le développement de l'industrie touristique favorise l'accès à de hautes altitudes pour un nombre croissant de personnes souvent peu familières des dangers de cet environnement, dont la caractéristique principale est l'hypoxie ambiante. Les pathologies aiguës liées à la haute altitude représentent donc un problème médical auquel tout praticien peut être confronté.

1.2. L'Ultra trail

Selon l'International Trail Running Association (ou ITRA), le trail se définit comme une compétition pédestre, idéalement en semi autosuffisance ou en autosuffisance, qui se déroule dans un environnement naturel (montagne, désert, forêt, plaine ...) et qui comporte moins de 20 % de routes cimentées ou goudronnées.

Selon la distance, on distingue 4 catégories de courses :

- Le Trail : distance inferieure à 42 km
- Le Trail Ultra Medium : distance comprise entre 42 et 69 km
- Le Trail Ultra Long : distance comprise entre 70 et 99 km
- Le Trail Ultra XLong : distance supérieure à 100 km

Un des premiers documents scientifiques international répertoriant les maladies spécifiques de l'ultra endurance est publié en 2014 (3). Ce document récent fait partie des rares rédigés à propos de cette discipline. Sur l'UTMB par exemple (Ultra-Trail du Mont-Blanc), la course catégorisé d'ultra trail de référence, où les meilleurs traileurs sont passés comme Thévenard Xavier vainqueurs plusieurs année dont 2018, D'Haene Francois, Killian Jornet, Dawa sherpa… les premières études ont eu lieu à partir de 2009 : elles portaient sur la fatigue en ultra-trail (4), sur les pathologies traumatiques et métaboliques lors d'un ultra-marathon de montagne (5), sur les désordres digestifs, sur les pathologies musculo-squelettiques des trailers, et sur les conduites d'automédication avec une liste de conseils et de risques liés à l'automédication (6).

En 2016 a été créé l'Ultra Sports Science

(7), une fondation visant à mettre en place des recherches internationales et diffuser des informations aux sportifs et aux médecins.

La plupart des études sont donc récentes et il y a encore peu de recul quant aux effets à long terme de la pratique des sports d'ultra endurance.

Les ultra trailers sont une population à priori en bonne santé, nécessitant peu de consulter les médecins généralistes. Cependant, malgré les études récentes, le comportement de cette population reste encore peu étudié, tant sur le plan de la préparation physique, des habitudes alimentaires et des compléments auxquels ont recours les coureurs, des conduites d'automédication ou de leur suivi médical. Il manque donc de nombreuses données relatives à ces efforts et les informations dispensées à ces sportifs ne sont pas toujours adaptées. Le lien entre ces comportements et la performance des coureurs n'est pas bien connu.

Cette discipline impressionne par le nombre de kilomètres et le dénivelé englouti par les pratiquants pendant les courses.

Par exemple, la course qui fait référence dans le milieu du trail est l'UTMB : quelques 166 km et 9400 m de dénivelé positif à parcourir ! En 2010, une nouvelle course apparaît avec toujours plus de challenge, le Tor des Géants : 330 km et 24 000 m de dénivelé positif à parcourir en moins de 150h.

Les athlètes de ces disciplines, comme ceux vu précédemment, ne cessent donc, au fil des années, de repousser les limites physiologiques.

Pour accomplir de tels exploits, les coureurs doivent se tenir à un entrainement rigoureux, intense et une hygiène alimentaire nécessaire et correspondante aux besoins des dépenses énergétique. Ces athlètes entrainés en endurance vont donc développer des niveaux élevés de capacité aérobie qui sont objectivés par des valeurs de consommation maximale d'oxygène (VO_{2max}) bien au-dessus de la moyenne.

Cette endurance est bien diminuée en altitude. Cependant, malgré la diminution de la performance observé durant les Jeux Olympiques de Mexico en 1968, aucune donnée n'existe pour des altitudes réelles proches de 2000 m, environnement dans lequel la majorité des compétitions importantes d'ultra-trail se déroulent et où se situe la plupart des camps d'entrainements.

1.3. Annapurna mandala trail (AMT)

L'Annapurna (8.091 m) est un sommet himalayen qui tient une place particulière dans le cœur des Français puisqu'il fut conquis par les alpinistes Maurice Herzog et Louis Lachenal le 3 juin 1950.
Cinq sommets composent le massif de l'Annapurna : Annapurna I (8.091 m), Annapurna II (7.937 m), Annapurna III (7.855 m), Annapurna IV (7.525 m) et Annapurna Sud (7.279 m). Une cinquantaine d'autres cimes font partie de ce gigantesque ensemble montagneux avec notamment le Varahashikhar (7.847 m), le

Gangapurna (7.485 m), le Khangsar Kang (7.485 m), le Tilicho Pic (7.134 m), le Nilgiri Nord (7.061 m) et le majestueux Machhapuchhare (6.993 m).
L'Annapurna Himal n'est pas le seul massif de la région. A l'Est, c'est le Manaslu qui se lève à 8.156 mètres. A l'Ouest, et ce n'est pas nouveau, l'impressionnante chaîne des Dhaulagiris et son plus haut sommet (8.167 mètres) barrent l'horizon. C'est dans cet univers d'exception, au cœur du « Continent Montagne » ; l'Himalaya, terre d'aventure par excellence, que se déroule l'Annapurna Mandala Trail. Une course, un voyage qui lie aventure humaine et sportive (8)

L'AMT est une course qui se déroule au Népal, pays qui fascine et lieu de passage de tous les grands sportifs amoureux de la montagne : alpiniste, coureurs, grimpeurs, randonneurs…

La première édition a été lancé en 2000 par le journaliste, auteur, coureur d'ultra fond et organisateur d'épreuves de grand fond dans la chaîne himalayenne, Bruno Poirier, « Chevalier du Vent » depuis 1992. Chaque année cette course est organisé sur plusieurs étapes avec en moyenne 300Km et +/- 15000 dénivelé positif et négatif avec au moins 1 ou 2 étapes à plus de 42Km pour pouvoir être qualifiée d'« ultra-trail » et un passage à plus de 5000m d'altitude .

L'AMT 2018 fut composé de 300 kilomètres (+/- 15.000 m) à parcourir en 11 étapes. Cette AMT parti de Arughat (608 m) pour faire le Tour du Manaslu, en passant par la Tsum Valley (la Vallée de la Lumière), franchir le Larkya La (5.210 m) et rejoindre l'Anneau des Annapurnas à Dharapani, avant de descendre vers le Lac Begnas, proche de Pokhara. Cette course composée de 23 concurrents permet aux meilleurs français de se concurrencer aux népalais et à leurs performances en hautes l'altitudes. Mais aussi de découvrir ce Pays et vivre une aventure humaine et sportive inégalable. Parmi ces concurrents, le Suisse Jules-Henri Gabiou vainqueur en 35h25 (possède un grands palmares : Vainqueur du Tor des Géants 2011, Vainqueur du GR73 2011, 2ème Annapurna Mandala Trail 2013, 3ème Grand Trail Valdigne 2012) a devancé les Népalais Sher Bahadur Tharu (37 h 28) et Bir Bahadur Tamang (39 h 13). Le premier français est Christophe Letellier (42 h 41). La Népalaise Mingma Sherpa s'est imposée en 53 h 15 devant la Française Mélanie Ringeval (66 h 10).

Aucune étude sérieuse n'a été réalisé afin de savoir comment affronter une course en hautes altitude (plus de 5000m d'altitude).

2. Physiologie de l'exercice

2.1. Le muscle

Le muscle est composé d'environ 75 % d'eau. Les plus importants d'un point de vue fonctionnel sont les protéines, qui correspondent à 20 % de la masse musculaire et sont responsables des propriétés contractiles du muscle (9).

D'un point de vue structurel macroscopique il existe trois types de muscles

- Muscles striés squelettiques : mouvements reflexes et mouvements volontaires.
- Muscles lisses : muscles des organes internes, contraction involontaire, faible puissance et faible fatigabilité.
- Muscle cardiaque : contractions involontaires rythmées, capacités de s'exciter indépendamment du système nerveux pour initier les battements cardiaques

Le corps du muscle est composé de fibres musculaires regroupées en faisceaux entourés de tissu conjonctif. Les extrémités du muscle sont des gaines de tissus conjonctifs différenciées en aponévrose et tendons fixés sur les os.

D'un point de vu structurel microscopique les principales protéines dont ils sont composés sont la myosine, l'actine, la troponine et la tropomyosine.

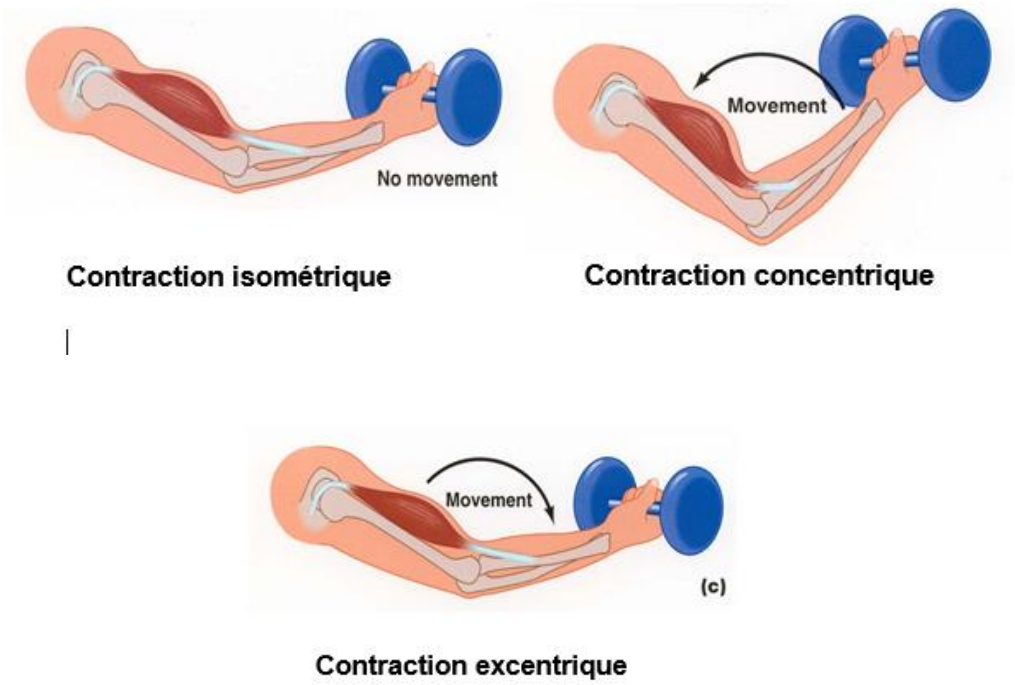
Les fibres musculaires sont composées de cellules musculaires cylindriques plurinucléées pouvant atteindre 30 cm de long, parallèles les unes aux autres. Les myofibrilles sont les unités contractiles formées de plusieurs sarcomères disposés bout à bout : les filaments minces d'actine à chaque extrémité portant des sites récepteurs de la myosine et les filaments épais de myosine au milieu portant des têtes capables de former des ponts transversaux avec l'actine. Le réticulum sarcoplasmique est composé de tubules parallèles qui renferment du calcium et contrôlent la concentration calcique de la cellule.

Lors de la contraction, la force musculaire est transmise au segment osseux sur lequel le muscle s'insère. Les muscles ayant un point d'insertion haut et bas sur 2 segments osseux séparés par une ou plusieurs articulations, les contractions musculaires permettent de rapprocher ces segments osseux.

Le muscle possède plusieurs types de fibres : les fibres lentes de type I (fibres rouges), les fibres intermédiaires de type IIa et les fibres rapides de type IIb (fibres blanches). Toutes les fibres musculaires appartenant à une unité motrice ont la même topologie.

Il y a 3 modes de contractions différents :

- Contraction statique ou isométrique : la force de contraction est égale à celle de l'environnement (il n'y a pas de mouvement).
- Contraction isotonique ou dynamique concentrique : Raccourcissement musculaire aboutissant à un mouvement
- Contraction excentrique : résistance du muscle à une force de traction, étirement du muscle qui freine le mouvement.



<u>Figure 1</u> : illustration des 3 modes de contraction. Source : Di Giorgio Carole.

Chaque mouvement recrute un ensemble de muscles qui sont complémentaires. Les muscles agonistes provoquent le mouvement, les muscles congénères aident au mouvement, les muscles antagonistes freinent le mouvement pour plus de précision, les muscles synergiques suppriment un degré de liberté et les muscles stabilisateurs stabilisent l'articulation.

La contraction musculaire se fait grâce à une transmission neuromusculaire.

Un influx électrique arrive au niveau des synapses neuromusculaires (plaques motrices) qui va libérer des neurotransmetteurs (acétylcholines) au niveau de la membrane musculaire et induire une impulsion électrique. L'activation des canaux Na+/K+ créent une onde de dépolarisation dans la cellule musculaire et libèrent massivement des ions Ca++ à l'intérieur de la cellule musculaire.

La fixation du Ca++ sur la tropomyosine libère des sites récepteurs de la myosine sur les filaments d'actine. La fixation de la myosine sur l'actine active une myosine ATPase. L'oscillations des ponts formés entre l'actine et la myosine grâce à l'hydrolyse de l'ATP fait déplacer les têtes de myosine le long de l'actine. L'hydrolyse d'une nouvelle molécule d'ATP provoque la dissociation des ponts et la formation de nouveaux ponts qui font avancer les filaments d'actine et de myosine les uns contre les autres. Cela provoque le raccourcissement du muscle.

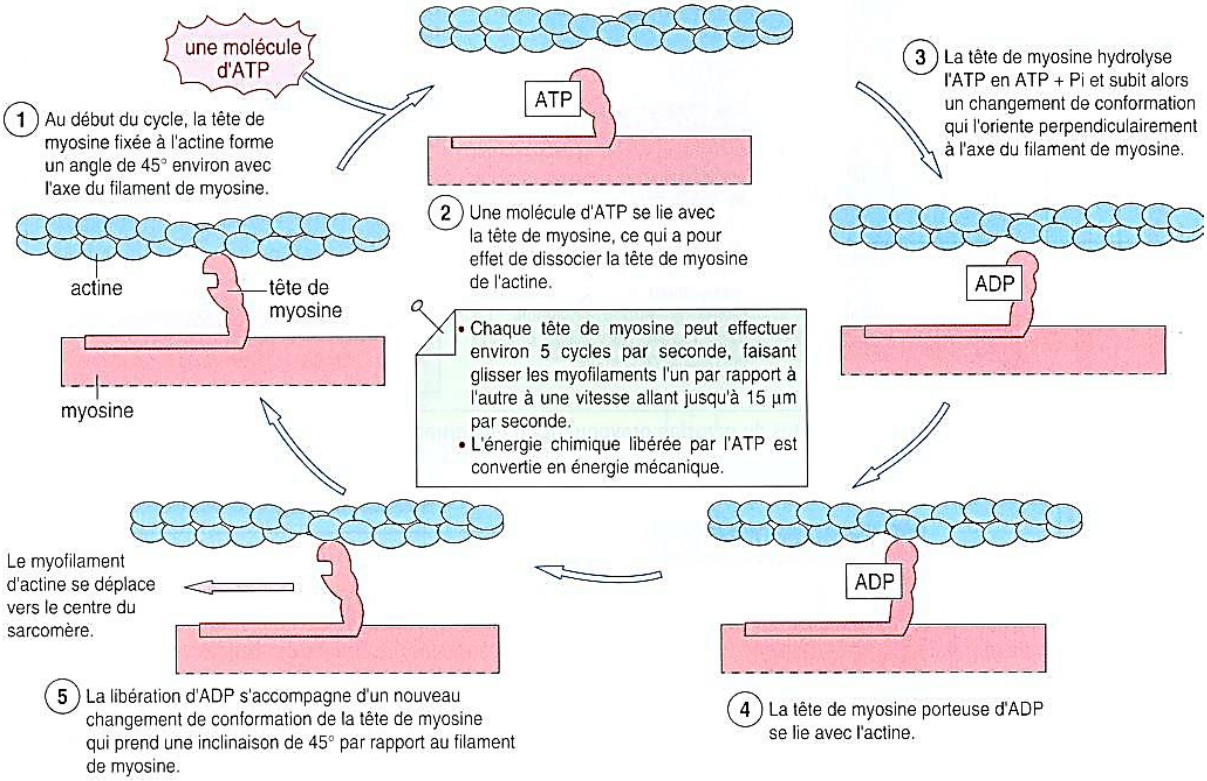


Figure 2 : contraction musculaire. Source : Di Giorgio Carole.

Une contraction musculaire nécessite un relâchement. Pour cela, la fermeture rapide des canaux calciques et le pompage actif vers la lumière du réticulum sarcoplasmique par des ATPases calcium-dépendantes permet un retour à la concentration initiale en Ca++ à l'intérieur du réticulum sarcoplasmique. Ce mécanisme consomme de l'énergie par hydrolyse de l'ATP (10).

D'importantes différences apparaissent entre les fibres musculaires des sportifs spécialistes d'activités très intenses et de courte durée (comme le sprint en athlétisme), et qu'on les compare avec celles de spécialistes d'activités plus longues (comme le marathon).

La fibre musculaire du marathonien possède beaucoup plus de fibres dites lente que celle du sprinter et inversement, le sprinter possède beaucoup plus de fibres dites rapide que celle du marathonien. Il existe trois sortes de fibres musculaires humaines : les fibres I dite lentes, les fibres IIb dites rapides et les fibres IIa

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

Les fibres I sont innervées par un petit motoneurone, elles ont une fréquence de décharge faible et un délai de contraction important. 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 permettant de synthétiser beaucoup plus d'énergie à partir de l'oxygène.

Les fibres IIb sont innervées par de gros motoneurones, elles ont une fréquence de décharge beaucoup plus importante et un délai de contraction faible. 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 beaucoup plus faible (expliquant une plus grande fatigabilité) et un nombre de mitochondries par fibre faible (la filière énergétique permettant à ces fibres rapides de synthétiser l'ATP n'utilise d'ailleurs pas l'oxygène et les réactions ne se déroulent pas dans la mitochondrie).

2.2. Les substrats énergétiques

L'ATP est donc le carburant unique du muscle, ses concentrations sont comprises entre 4 et 7 $mmol.kg^{-1}$, soit moins de quelques secondes d'exercice. Ses concentrations sont supérieures uniquement dans les fibres de type II. Il est nécessaire de rapidement re-phosphoryler l'ADP en ATP pour permettre la poursuite de la contraction suivant les trois voies de resynthèses, la voie anaérobie alactique, anaérobie lactique et aérobie. (11)

La crétine phosphate est un autre substrat énergétique de 14 à 20 $mmol.kg^{-1}$, 3 fois supérieures à celle de l'ATP. Sa réserve est épuisée en 10 secondes lors d'un effort maximal et en 20 à 30 secondes pour un effort à 70% de la puissance maximale. Sa concentration est supérieure dans les fibres de type II. La déplétion en CP diminue la performance.

Le glucose est réservé dans le sang et le muscle. Sa consommation est proportionnelle à l'intensité de l'exercice. La réserve totale en glucose est de 16g. Au-delà, un apport endogène est nécessaire (réserve de glycogène) ou exogène (ravitaillement). Il y a donc deux voies métaboliques pour utiliser ce substrat. La glycolyse anaérobie (voie anaérobie lactique) est stimulée par le manque d'ATP (rapport ATP/ADP) et inhibée par l'augmentation de la concentration musculaire en lactate et en H+. L'Oxydation du glucose (voie aérobie)

stimulée par le manque d'ATP (rapport ATP/ADP) et activée par l'augmentation de la concentration musculaire en lactate et en H+.

Le glycogène possède sa réserve énergétique dans les muscles (70%) et le foie (30%). Il est utilisé lors d'un exercice d'intensité relativement élevée par la glycogénolyse. La dégradation du glycogène en glucose dans le muscle, puis dans le foie permet de libérer du glucose dans le sang

Les lipides sont utilisés par la voie aérobie. Ils sont stockés dans le muscle, le foie et les tissus adipeux sous forme de triglycérides.

La libération des acides gras et du glycérol dans le sang se fait par la lipoprotéine lipase. La Béta-oxydation des acides gras en acétyl-CoA dans les mitochondries se fait par le cycle de Krebs. Le bilan pour un acide gras à 6 carbones est de 45 ATP.

Les acides-aminés sont utilisés par la voie aérobie. Les protéines sont utilisées à la fin des efforts de très longue durée (3-5 heures) : capture de l'alanine musculaire pour la transformer en glucose. C'est un mécanisme de sauvegarde qui consiste à détruire les muscles pour alimenter le SNC en glucose lors de conditions extrêmes. La transformation de l'alanine en acide pyruvique est utilisée par le foie pour produire du glucose.

2.3. Les intermédiaires métaboliques

L'acide lactique est la conséquence de la production de lactate par la voie anaérobie lactique. L'augmentation de la lactatémie diminue le pH sanguin. La recapture par le foie des lactates se fait par le cycle de Cori, il transforme le lactate en glucose en présence de glycogène. Lorsque l'effort est trop intense le foie est dépassé et le lactate s'accumule dans le muscle ce qui provoque une acidose musculaire (11).

Le CO2 est produit par décarboxylation aérobie des substrat énergétiques au niveau du cycle de Krebs. Le bicarbonate limite la chute du pH due à la formation du lactate par un système tampon ($HCO3^- + H^+ \rightarrow$H2CO3 $\rightarrow$H2O + CO2). De plus, l'hyperventilation en début et fin d'exercice permet la libération de ce CO2.

Les radicaux libres sont produits lors de la contraction musculaire par la filière aérobie, via les mitochondries (flux continu de radicaux libres dérivés de l'oxygène) et par les contraintes mécaniques exercées sur les fibres musculaires et la chaleur dégagée par le muscle (réaction inflammatoire locale productrice de NO).

2.4. Les filières de synthèse énergétique

La contraction musculaire nécessite des molécules d'Adénosine Triphosphate (ATP). La quantité d'ATP dans notre corps est faible et ne permet pas de soutenir l'exercice pendant plus de 2 à 3 secondes. C'est ensuite d'autres processus qui vont permettre de synthétiser de l'ATP tout au long de l'effort :

- La créatine phosphate en se dégradant crée de l'ATP nécessaire à la contraction musculaire pendant ≈ 10sec

- C'est ensuite la dégradation du glucose qui fournit prioritairement de l'ATP aux muscles avant que la dégradation du glycogène prenne le relais

- Enfin, passé environ 40 minutes d'effort, c'est la dégradation des acides gras qui produit l'ATP

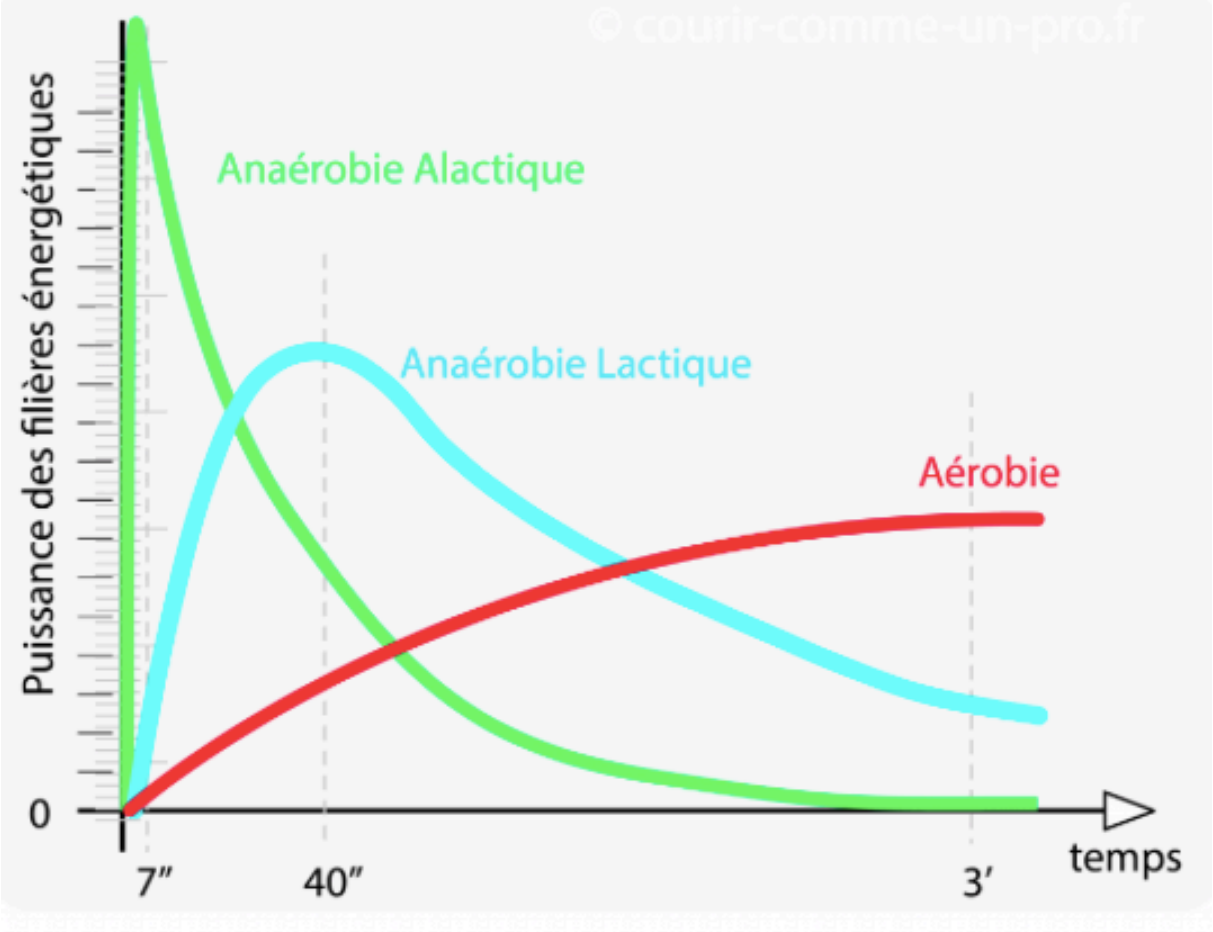


Figure 3 : la participation des différentes filières énergétiques.

2.4.1. Le processus anaérobie alactique

Ce processus est rapide et ne nécessite pas la présence d'oxygène (ANAEROBIE) de plus il est ALACTIQUE (faible production d'acide lactique). Durant les premières secondes de l'exercice musculaire à intensité maximale (sprint), la quantité d'ATP est maintenue à un niveau relativement constant. Mais au bout de 7

secondes à effort maximal, les niveaux d'ATP et de Créatine Phosphates (CP) deviennent trop faibles pour permettre d'assurer des contractions musculaires. L'objectif de ce système ATP-CP : la Vitesse. Au- delà` de cette période, les muscles doivent utiliser d'autres processus pour continuer la couverture énergétique. Ce processus est plutôt utilisé par les fibres blanches rapides de type IIb (12).

2.4.2. Le processus anaérobie lactique

Ce deuxième moyen de production de l'ATP implique la libération d'énergie par la dégradation du glucose qui représente 99% des sucres circulant dans le sang, ce procédé est appelé glycolyse. Au repos, le glucose est pris en charge par le muscle et le foie qui le transforme en glycogène musculaire. Ce dernier a l'avantage de pouvoir être stocké et dégradé à la demande. L'objectif de ce système est la résistance.

La fourniture d'énergie est importante mais de durée relativement courte (de 30 secondes à intensité max à 2' pour une intensité moindre. L'apport de l'oxygène est insuffisant (ANAÉROBIE), la présence d'une quantité importante de lactates (ACIDE LACTIQUE) dans le sang oblige l'interruption de l'exercice. Ce processus est plutôt utilisé par les fibres intermédiaires de type IIa.

2.4.3. Le processus aérobie

Le dernier système cellulaire de production d'énergie est le système aérobie (oxydation des nutriments). Cette réaction se produit dans les mitochondries, usines à oxygène, situées dans la fibre musculaire. Les mitochondries sont nombreuses dans les tissus ayant une haute activité comme les muscles. Elles permettent notamment la respiration de la cellule et la mise en réserve de l'énergie (considérées comme centrale énergétique de la cellule).

La présence d'O2 (VOIE AÉROBIE) permet un fonctionnement d'intensité modérée mais de très longue durée. Cette dégradation des glucides, des lipides et de quelques protéines par voie aérobie s'accompagne d'une production de résidus ayant peu d'influences à court terme sur la fatigue. La dégradation du glucose se fait à partir des réserves du foie : la glycogénolyse. Ce processus est plutôt utilisé par les fibres rouges lentes de type I.

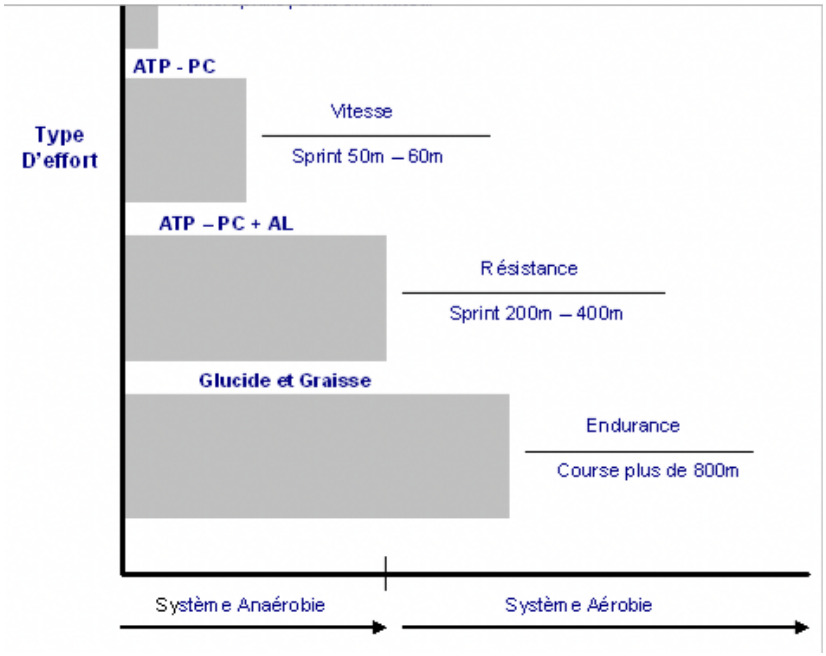


Figure 4 : objectifs et propriétés des différentes filières énergétiques.

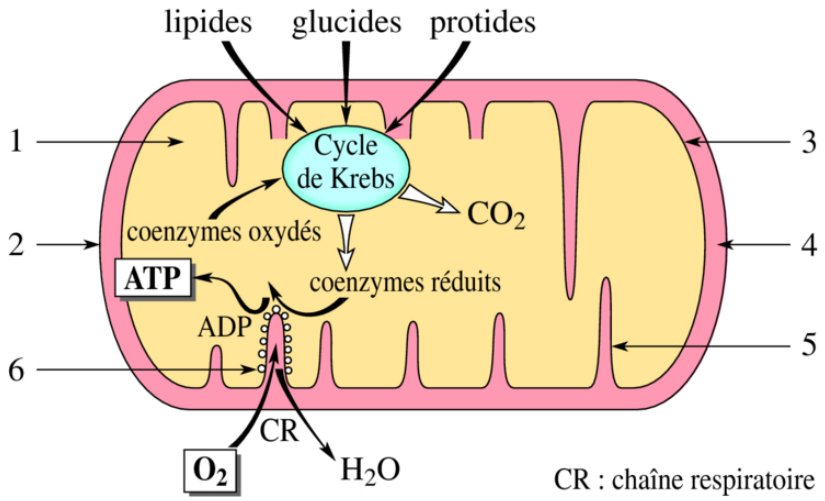


Figure 5 : mitochondrie : lieu de respiration cellulaire 1/matrice 2/mb externe 3/mb interne 4/espace inter membranaire 5/crête 6/protéine de la chaine respiratoire

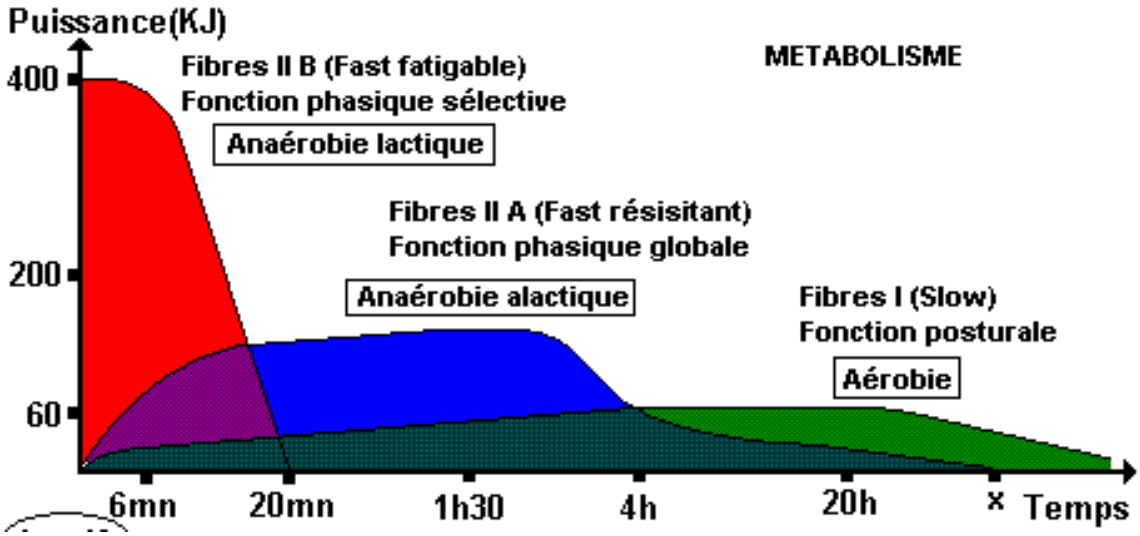
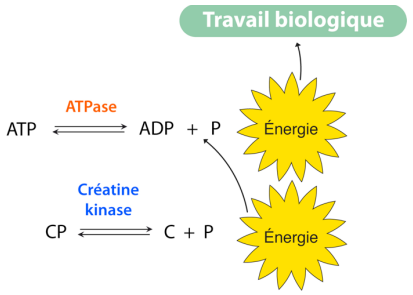


Figure 6 : implication des différents types de fibres musculaires.

2.4.4. Cas des exercices de très courte durée

Lors des exercices de très courte durée (6 à 8 secondes maximum) c'est la filière énergétique ANAEROBIE ALACTIQUE qui sert à re-synthétiser l'ATP. Aérobie signifie « en présence d'oxygène ». À l'inverse cette filière utilisée pour les exercices de très courte durée n'utilise pas l'oxygène pour re-synthétiser l'ATP. Elle est donc dite A-NAEROBIE. Puisqu'elle ne produit pas d'acide lactique, contrairement à une autre filière, elle est dite A- LACTIQUE.

On l'appelle également filière CREATINE PHOSPHATE, car c'est le transfert d'énergie effectuée à partir de cette molécule qui permet de re-synthétiser l'ATP.



Pour chaque filière énergétique, la puissance dépend du débit de re-synthèse de molécules d'ATP, c'est-à-dire de la quantité de molécules d'ATP re-synthétisées par unité de temps. S'il y a peu de réactions nécessaires, le débit de re-synthèse est important. Si beaucoup de réactions sont nécessaires, le débit est beaucoup plus faible. Dans le cas de la filière créatine phosphate, une seule réaction est nécessaire pour re-synthétiser de l'ATP et

donc la puissance très importante. Les autres filières nécessitent plus de réactions et ont donc une puissance plus faible. C'est la raison pour laquelle on est capable de courir beaucoup plus vite sur 40 m que sur 400 m et que sur un marathon.

Cependant, cette filière énergétique possède une quantité totale de molécules d'ATP à re-synthétiser très faible. Il n'y a qu'une seule molécule d'ATP re-synthétisée à partir d'une molécule de créatine phosphate. Si on est capable de développer une très grande puissance grâce à cette filière, on ne peut maintenir l'intensité très longtemps. La capacité de cette filière est donc faible. Pour chaque filière la capacité correspond à la quantité totale de molécules d'ATP re-synthétisées à partir d'une molécule du substrat d'origine (la créatine phosphate dans ce cas). Cela explique donc qu'on est capable de tenir à une allure de sprint beaucoup moins longtemps qu'à une allure d'un marathon.

Plus précisément, la durée pendant laquelle cette filière énergétique est capable de re-synthétiser de l'ATP dépend de la concentration de créatine phosphate intramusculaire. Celle-ci est environ 5 fois plus élevée que la concentration d'ATP, mais cela ne nous permet pas d'effectuer des exercices de durée importante.

Cette filière anaérobie alactique ou créatine phosphate est donc la filière utilisée dans les activités dites explosives par exemple lors du départ en sprint, dans les sauts, les lancers ou dans toutes actions correspondant à des besoins énergétiques très importants, immédiats et de très courte durée. Si l'exercice se prolonge, l'organisme va faire appel à une autre filière, dont les caractéristiques de puissance et de capacité seront différentes, pour re-synthétiser l'ATP.

2.4.5. Cas des exercices de courte-moyenne durée

Lorsque l'exercice intense doit se prolonger et que les stocks de créatine phosphate ne peuvent pas suffire, un autre substrat énergétique doit être utilisé pour re-synthétiser l'ATP. C'est le glucose ou le glycogène qui permettent la re-phosphorylation de l'ADP en ATP. Ces réactions sont nommées : la glycolyse ou la glycogénolyse. Le glucose et le glycogène sont les seuls substrats capables de re-synthétiser l'ATP dans ces conditions d'exercice relativement intense. Il ne s'agit plus d'une intensité aussi importante que celle développée par la filière anaérobie alactique, mais elle nécessite tout de même qu'un nombre relativement restreint de réactions soient utilisées pour re-synthétiser l'ATP afin que la puissance soutenue soit relativement importante. Pour répondre à ces conditions, les réactions doivent se dérouler dans le cytosol de la cellule musculaire, et non dans la mitochondrie. Et dans ces conditions seuls le glucose et le glycogène sont capables de fournir l'énergie nécessaire.

Il a donc 10 réactions successives qui vont aboutir à la formation de deux ions pyruvates en partant soit du glucose soit du glycogène. Alors que l'objectif est de re-synthétiser de l'ATP, les premières réactions en

consomment 2 jusqu'à aboutir à la formation d'une molécule de fructose 1,6 diphosphate. Cette molécule se dissocie en 2 molécules de 3-phosphoglyceraldéhyde dont la transformation va donner au final deux ions pyruvates. Ces dernières réactions vont permettre de former 4 molécules d'ATP. Le bilan de la glycolyse/ glycogénolyse est donc de 4 ATP formés -2 ATP consommés soit au final : 2 ATP formés par molécule de substrat.

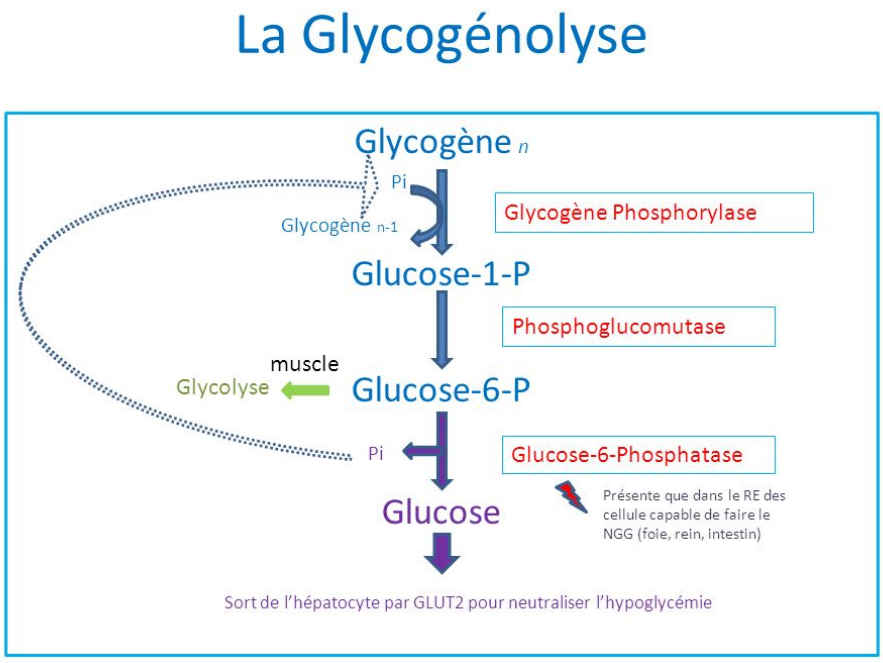
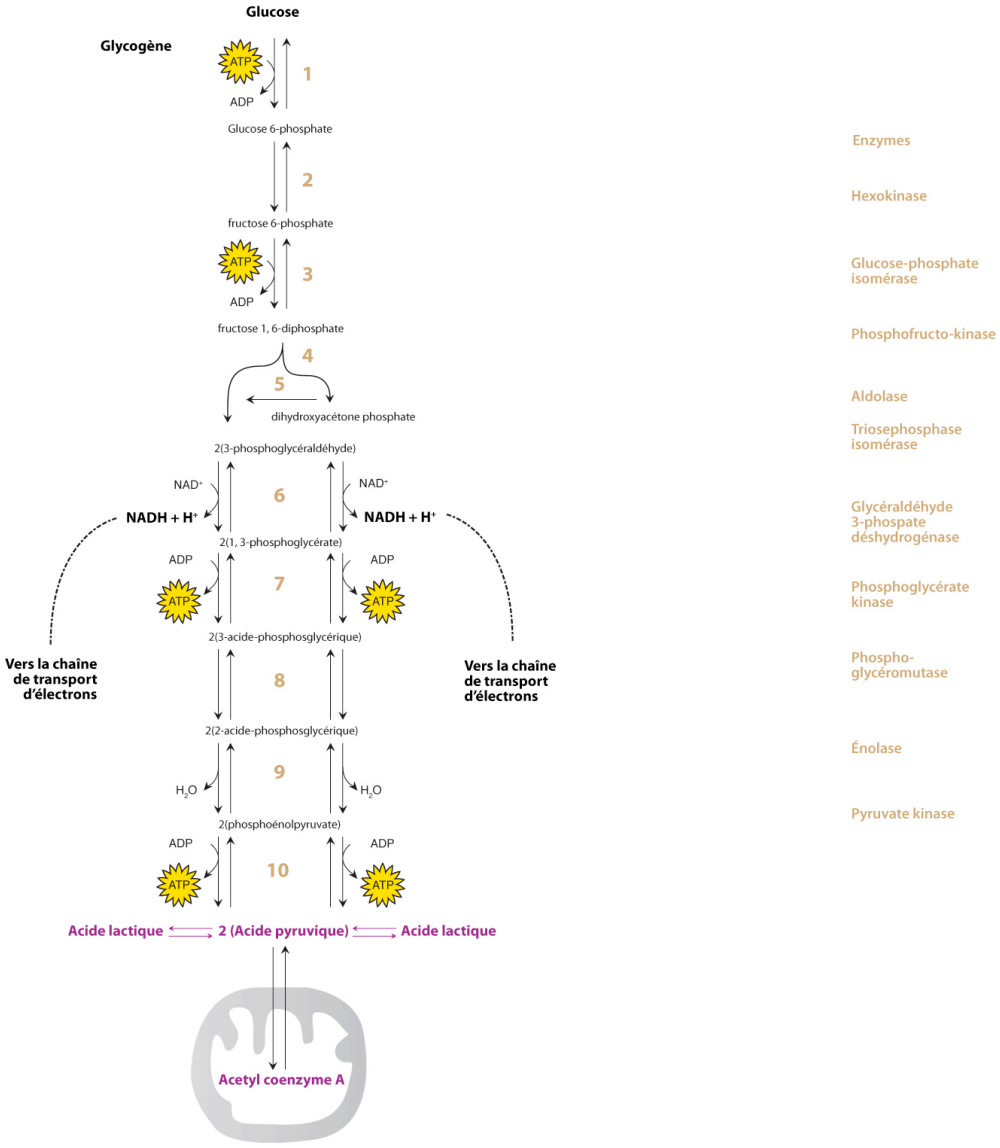


Figure 7 : la glycogénolyse.



<u>Figure 8</u> : glycogénolyse, glycolyse et production d'ATP. Schéma des 10 réactions successives qui permettent la formation de deux ions pyruvates en partant soit du glucose soit du glycogène

Si on compare à la filière créatine phosphate ou anaérobie alactique, la glycolyse/glycogénolyse a une capacité plus importante. Premièrement, parce que 2 molécules d'ATP sont formées à partir d'une molécule de glucose/ glycogène contre une seule molécule d'ATP formée à partir d'une molécule de créatine phosphate. Mais surtout parce que le stock de glucose et de glycogène utilisable par le muscle est beaucoup plus important que le stock de créatine phosphate. La quantité totale de molécule d'ATP re-synthétisées et donc au final beaucoup plus importante qu'avec la filière créatine phosphate. Cependant, 10 réactions sont nécessaires pour re-synthétiser cet ATP contre une seule avec la filière créatine phosphate, induisant un débit pour re-synthétiser l'ATP et donc une puissance beaucoup plus faible. C'est la raison pour laquelle on est capable de tenir beaucoup plus longtemps une allure de 800 m qu'une allure de 40 m (environ 2 minutes contre quelques secondes) mais que cette allure de 800 m est beaucoup moins élevée qu'un départ de sprint.

Cette réaction de glycolyse/glycogénolyse ne s'arrête pas aux 2 ions pyruvates formés. Ceux- ci se transforment en acide lactique. Comme l'ensemble de ces 11 réactions se déroulent en dehors de la mitochondrie en absence d'oxygène et qu'elle aboutit à la formation d'acide lactique, on appelle cette filière, la filière anaérobie lactique.

Si cet acide lactique a souvent mauvaise réputation, sa formation est en réalité bénéfique au métabolisme. Les réactions de glycolyse/glycogénolyse se déroulant dans le cytosol sont dites oxydatives, c'est-à-dire qu'elles libèrent des ions H^+, appelés protons, dont toute augmentation importante est dangereuse pour l'organisme qui peut heureusement contrôler leur concentration.

Dans le cytosol, ces protons vont être associés à une molécule appelée Nicotinamide Dinucléotide (ou NAD) afin de limiter leur effets néfastes potentiels et de les transporter vers la chaine de transport d'électrons qui permettra ultérieurement de re-synthétiser de l'énergie. Le NAD dans tous les cas est nécessaire à la poursuite de la glycolyse/glycogénolyse.

Le problème est que la quantité de NAD à l'intérieur du cytosol est très limitée. Il faut donc absolument réoxyder le NADH formé en NAD.

Pour cela 2 solutions existent : soit transformer les ions pyruvates en ions lactates, soit continuer la transformation des ions pyruvates dans la mitochondrie. La première solution est utilisée lorsque l'intensité d'exercice est importante. Dans ce cas les différentes réactions de la glycolyse sont fortement stimulées. Une quantité importante d'ions pyruvates est donc formée. Seule une quantité infime de ces ions peut alors rentrer dans la mitochondrie du fait d'un phénomène de barrage. La majorité des ions pyruvates sont donc transformées en acide lactique sous l'action de l'enzyme lactate déshydrogénase (LDH).

Cette réaction de transformation d'ions pyruvate en acide lactique permet de réoxyder le NADH en NAD et de recommencer et continuer les réactions de glycolyse/glycogénolyse tant que l'exercice le nécessite. L'acide lactique ne doit donc pas être considèré comme un simple déchet musculaire, car sa formation joue un rôle important dans la poursuite de l'exercice intense.

Ce qui est vrai par contre c'est que l'augmentation de sa concentration est la preuve de la sollicitation importante de la filière anaérobie lactique, et qu'elle est associée à une acidose importante qui induit des sensations d'effort importantes.

Il faut donc un certain degré d'entrainement et de performance pour être capable d'atteindre des concentrations importantes d'acide lactique. Les athlètes élites de demi-fond ont donc des concentrations beaucoup plus élevées à la fin d'un 800m qu'un novice, car ils sont capables de solliciter beaucoup plus leur filière anaérobie lactique. Mais puisque l'augmentation de la concentration d'acide lactique signe la preuve de l'utilisation de

la filière anaérobie lactique, sollicitée durant les exercices de courte à moyenne durée, les douleurs musculaires du marathonien ont peu de chance d'être induites par des taux importants d'acides lactique contrairement à ce que l'on entend fréquemment. Dans ce cas, ces douleurs sont beaucoup plus certainement dues aux microlésions musculaires induites par les chocs et les contractions excentriques ainsi qu'à la répétition des mouvements ou par l'accumulation d'autres métabolites tels que l'ammonium.

On peut facilement mesurer la concentration sanguine des ions lactates et cela a un intérêt majeur : une augmentation de leur concentration sanguine est la preuve de l'utilisation de la filière anaérobie lactique dans la re-synthèse d'ATP. C'est donc la preuve que l'exercice ne pourra pas être soutenu très longtemps à cette intensité. En fait, c'est la concentration à l'intérieur de la cellule musculaire qui est intéressant car c'est là que les ions lactates sont produits. Mais puisqu'il y a un échange entre les métabolites produits au niveau cellulaire et les compartiments sanguins via les capillaires qui entourent les cellules musculaires, on peut comprendre indirectement ce qui se passe dans la cellule en analysant le contenu des capillaires sanguins.

Dans le cas des ions lactates, un simple prélèvement de quelques microlites de sang au bout du doigt (une simple goutte), ou éventuellement au niveau du lobe de l'oreille, permet de connaitre la concentration capillaire en ions lactate et d'avoir une idée assez précise de ce qui se passe dans la cellule musculaire.

La réalisation d'un exercice dont on augmente progressivement l'intensité est idéale pour étudier et comprendre l'évolution de la production des ions lactates. Ce type d'exercice est dit triangulaire car la représentation graphique des différents paliers d'intensités ressemble à un triangle avec différentes marches d'escaliers qu'on appelle incréments. Le plus célèbre de ces exercices est le test Léger et Boucher, du nom des scientifiques qui l'ont proposé en 1980. Il se réalise en course à pied, autour d'une piste que l'on a balisée. Le coureur doit passer devant le plot au moment d'un signal sonore. Le test débute à 8 km/h et la vitesse augmente de 1 km/h toutes les 2 minutes de course. Le test s'arrête quand l'athlète ne peut plus suivre le rythme imposé.

Lors d'un exercice de ce type, on observe une concentration capillaire d'ions lactates très faible au début de l'exercice. C'est très logique et cela se comprend facilement lorsque l'on reprend le schéma qui représente les différentes réactions de la glycolyse/glycogénolyse. Lorsque l'on court à une allure très faible (8 km/h par exemple dans le cas du 1^{er} palier du test de Léger et Boucher), l'énergie dépensée est très faible. De ce fait, la quantité de molécule d'ATP qu'il faut re-synthétiser est très faible. Les différentes réactions de la glycolyse/glycogénolyse fonctionnent donc à bas régime. Au final, il y a donc très peu d'ions pyruvates formés. Ceux-ci sont préférentiellement transformés au sein de la mitochondrie selon des réactions qui correspondent à la filière aérobie. Une faible quantité d'ions pyruvate est néanmoins toujours transformé en acide lactique, dont la concentration est donc légèrement plus élevée que dans des conditions de repos.

Quand on passe de 8 km/h à 9 km/h, cela correspond à très peu de différences pour la concentration en ions lactates. La chaine de transformation fonctionne un peu plus vite car il faut re-synthétiser un peu plus d'ATP, mais la quantité d'ions pyruvates formée reste gérable au niveau de la mitochondrie et toujours aussi peu d'acide lactique est produit.

Cependant, quand l'allure augmente progressivement, la quantité d'ions pyruvates formée devient ingérable par la mitochondrie au bout d'un certain moment, à une certaine vitesse qui est propre à chacun, en fonction du niveau de condition physique.

A partir de ce moment, de cette vitesse, les ions pyruvates, produit en quantité toujours plus importante, sont majoritairement transformés en acide lactique, dont la concentration augmente exponentiellement. Ce seuil particulier à partir duquel les ions pyruvates sont préférentiellement transformés en ions lactates est bien connu sous le nom de seuil lactique. Ce seuil est utilisé pour individualiser l'endurance aérobie et l'entrainement.

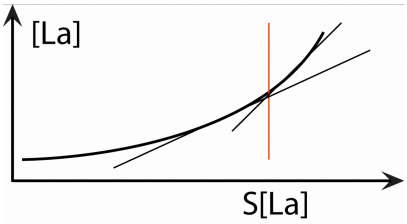


Figure 9 : augmentation exponentielle de la concentration des ions lactates. Seuil lactique.

2.4.6. Cas des exercices de longue durée

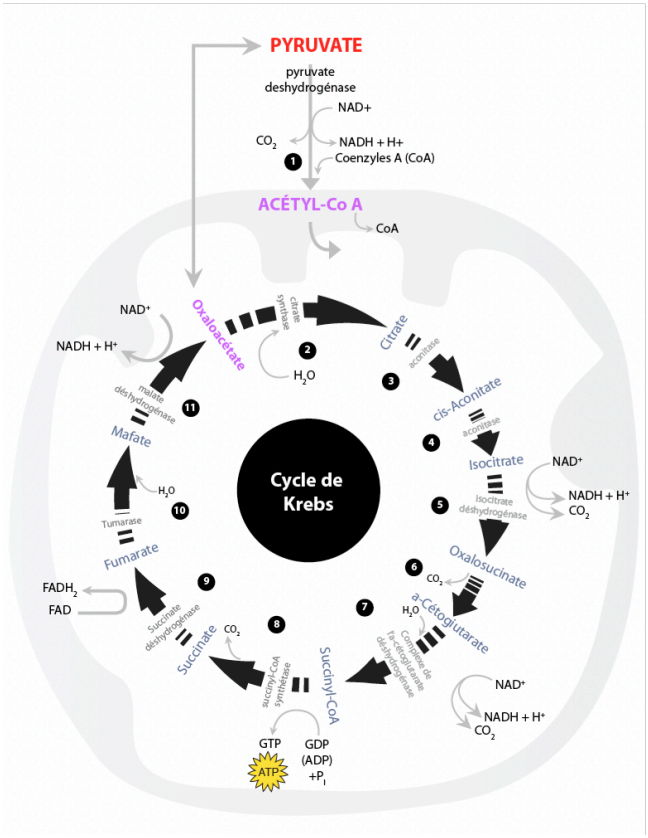
Une dernière filière existe. Cette dernière est différente de la filière anaérobie alactique servant à re-synthétiser l'ATP lorsque les besoins énergétiques sont très importants, immédiats, de très courte durée, et de la filière anaérobie lactique utilisée lorsque les besoins sont un peu moins importants et qu'ils se prolongent légèrement. La filière aérobie, permet de re-synthétiser l'ATP lorsque les besoins sont beaucoup plus faibles, mais de beaucoup plus longue durée. Elle peut être efficace pendant plusieurs heures, voire plusieurs jours dans le cadre des efforts d'ultra endurance. On l'appelle aérobie car elle utilise l'oxygène au sein de la mitochondrie. On l'appelle donc également filière mitochondriale.

Lorsque c'est le glucose ou le glycogène qui sont utilisés pour re-synthétiser l'ATP par la filière aérobie, le début des réactions est commun à la filière anaérobie lactique. La filière aérobie utilise non seulement le glucose et le glycogène comme c'était le cas pour la filière anaérobie lactique, mais aussi les lipides et les protéines.

Dans le cas du glucose et du glycogène, les 10 premières réactions amenant à la formation d'ions pyruvates se déroulent de la même façon.

C'est seulement ensuite qu'il existe des différences importantes avec la filière anaérobie lactique. Les besoins énergétiques sont moins importants et les réactions de la glycolyse/glycogénolyse sont donc peu stimulées. Peu d'ions pyruvates sont formés et une grande majorité´ d'entre eux peuvent donc entrer dans la mitochondrie. Différentes réactions vont permettre de réoxyder le NADH en NAD, particulièrement important pour que les réactions en amont (celles de la glycolyse/glycogénolyse) puissent continuer.

La première solution pour cela, utilisée lorsque les besoins énergétiques sont importants : elle consiste à faire accepter 2 protons par les ions pyruvates en les transformant en acide lactique. La 2ème solution est celle qui est utilisée lorsque les besoins sont moins importants et se déroule au sein de la mitochondrie durant les réactions de la filière aérobie. Une fois dans la mitochondrie, les ions pyruvates sont transformés en acétyl-coenzyme A qui va être oxydé durant ce qu'on appelle le cycle de Krebs.



<u>Figure 10</u> : cycle de krebs composé de 11 étape au sein de la mitochondrie.

La principale fonction du cycle de Krebs consiste à libérer des électrons provenant des protons puis de re-synthétiser de l'ATP. Ces électrons seront transportés sur la chaine respiratoire par l'intermédiaire du NAD

et d'une autre molécule de transport, le FAD. C'est au niveau de cette chaine respiratoire que va principalement se faire la re-synthèse d'ATP et la réoxydation du NADH.

Cette chaine respiratoire se situe au niveau de la paroi interne de la mitochondrie et est constituée de plusieurs complexes protéiques. La réoxydation du NADH s'accompagne d'un gradient de proton, c'est-à-dire du passage de protons du milieu intra vers le milieu extra-mitochondrial. En repassant par une protéine membranaire particulière, l'ATP synthase, les protons vont permettre de re-synthétiser l'ATP en phosphorylant l'ADP. Cet ensemble de réactions se produisant dans la chaine respiratoire est appelé la phosphorylation oxydative.

Comme cette filière nécessite un grand nombre de réactions chimique, le débit de re- synthétisation de l'ATP et donc la puissance sont faibles, beaucoup plus faible que celle des 2 autres filières. C'est pourquoi on court beaucoup moins vite un marathon qu'un 800m ou qu'un 60m. Cependant, un nombre beaucoup plus important de molécule d'ATP est re-synthétisé à partir d'une molécule de glucose ou de glycogène. Le bilan final de la glycolyse/glycogénolyse + le cycle de Krebs + la phosphorylation oxydative est d'environ 36 ATP à partir d'une molécule de glucose/glycogène, contre seulement 2 ATP avec la filière anaérobie lactique et 1 ATP à partir de la créatine phosphate de la filière anaérobie alactique. On comprend donc qu'il est possible de courir beaucoup plus longtemps avec cette filière qu'avec les 2 autres.

L'autre intérêt de cette filière, c'est son pouvoir d'utiliser les autres nutriments, lipides et protéines, pour re-synthétiser l'ATP. Les lipides ont une place prépondérante dans la re-synthèse par le biais de la filière aérobie.

Le cas des protéines interviendrait dans la re-synthèse d'ATP lorsqu'il y une diminution des réserves glycogéniques, notamment du fait de l'apparition de la fatigue. Elles restent la dernière réserve à utiliser en cas de grande demande, fatigue et l'épuisement des autres réserves.

Comme par exemple, lors d'un ultra trail comme le GHR (Great himal race) qui a eu lieu au Népal en 2017 composé d'un total de 1609 kilomètres, 84000 en dénivelé positif et 82500 en dénivelé négatif. Le nombre de kilomètres par étapes, l'accumulation sur 45 jours, les ressources énergétiques alimentaires nécessaires à leurs dépenses quotidiennes limitées par les conditions de vie du pays, les 30 participants et 11 coureurs arrivant (le peu d'arrivant marque la difficulté de cette course) ont tous dû puiser à un moment dans leurs réserves protéiques. Cela a ainsi provoqué une perte considérable de leur masse grasse dans les premiers jours puis musculaire et donc une perte de poids notable pour tous les coureurs à la fin de leur périple. Pour illustrer cette incroyable défis, le GHR consiste à traverser l'himalaya népalais d'Est en Ouest. La première moitié du parcours parti du camp de base du Kachenjunga, jusqu'à la région de l'Helambu. Ensuite, le GHR a poursuivi sa route vers le Langtang, le Ganesh himal, le Manaslu, les Annapurnas, le Mustang, le Doplpo, Simli Valley et Humla Valley pour le terminer à Hisla, village de la frontière Ouest entre le Népal et le Tibet.

Pour revenir à cette filière aérobie, après s'être associés à des molécules d'eau, les triglycérides (gouttes de graisses) peuvent intégrer la glycolyse ou le cycle de Krebs au même titre que le glucose ou le glycogène. Le glycérol entre dans la filière énergétique lors de la glycolyse alors que les acides gras intègrent le cycle de Krebs après un processus appelé Béta Oxydation. Ce processus, tout comme la glycolyse et le cycle de Krebs vont libérer des protons qui permettront de fournir de l'énergie grâce à la chaine mitochondriale. L'intérêt majeur de l'utilisation des lipides plutôt que des glucides dans la filière aérobie, c'est qu'une molécule de lipide va permettre de re-synthétiser beaucoup plus d'ATP qu'une molécule de glucose ou de glycogène. Au lieu des 36 ATP re-synthétisé à partir du glucose/glycogène, ce sont jusqu'à 460 ATP qui seront produits à partir d'une molécule de lipide. De quoi augmenter largement l'endurance de ce métabolisme.

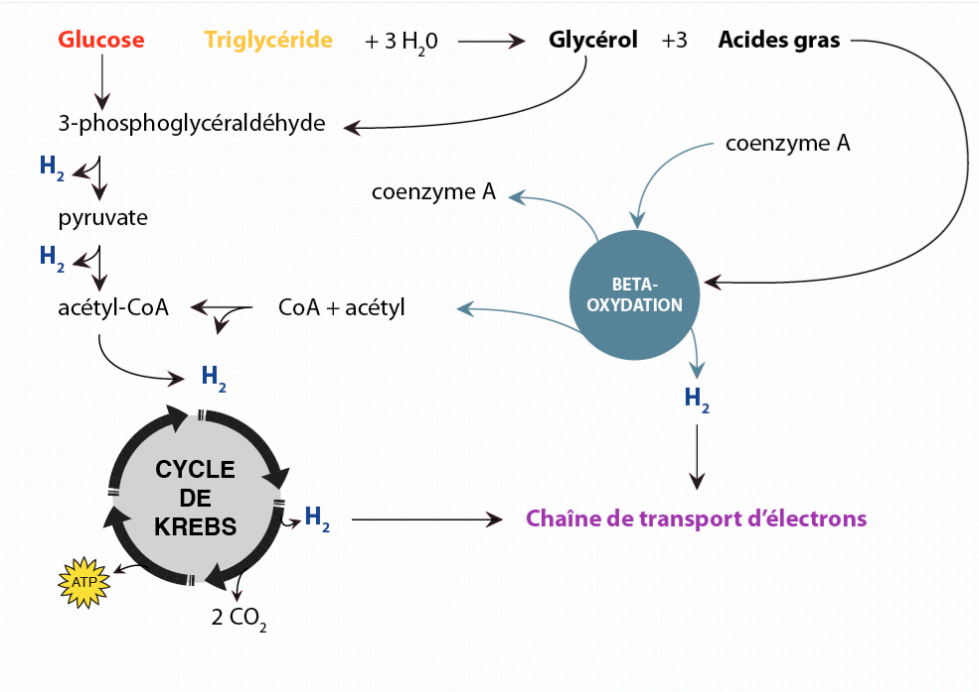


Figure 11 : résumé des étapes de la filière aérobie.

Mais il faut une condition particulière pour que la filière aérobie puise dans les lipides plutôt que dans les glucides : il faut que l'intensité d'exercice soit faible.

En fait quel que soit l'intensité, il y a toujours une certaine proportion à la fois des lipides et des glucides qui interviennent dans la re-synthèse d'ATP. Mais cette proportion diffère largement selon que l'intensité soit élevée ou faible. Au plus l'intensité est faible, au moins la re-synthèse d'ATP provient des glucides et au plus elle provient des lipides, et inversement. Voilà pourquoi si l'on veut maigrir, il vaut mieux courir ou nager ou rouler à une intensité faible pendant longtemps qu'à une intensité plus élevée.

2.5. Adaptation cardiorespiratoire (11)

Pendant un effort la consommation d'oxygène varie. En début d'exercice en anaérobie, l'adaptation ventilatoire se fait après quelques minutes : augmentation de l'amplitude respiratoire et de la fréquence respiratoire. Le Quotient Respiratoire QR est le rapport entre le débit de CO2 et la consommation d'oxygène QR = VCO2/VO2. Au repos : QR <1, en effort aérobie : QR <1 jusqu'à la limite maximale aérobie (seuil lactique→QR = 1) et en efforts anaérobie : QR >1 (effort écourté par le manque d'oxygène).

De plus, pour distribuer efficacement l'oxygène aux muscles, le débit cardiaque se voit lui aussi augmenté avec une modification de la répartition de la masse sanguine corporelle, adaptation de la courbe de dissociation de l'oxyhémoglobine et augmentation de la pression artérielle.

En ce qui concerne la modification de la répartition de la masse sanguine corporelle, après 3 à 4 minutes d'effort, le débit sanguin va être diminué dans les territoires non concernés par l'exercice, 80 à 85% (contre 5% au repos) du débit cardiaque va être redirigé vers les muscles proportionnellement à l'effort. La pression artérielle est aussi augmentée par vasoconstriction afin de redistribuer le débit cardiaque aux muscles actifs.

Le retour veineux est amélioré par la contraction des muscles des membres inférieurs et en particulier des mollets qui chassent le sang veineux vers le cœur, par l'augmentation de l'activité de la cage thoracique et par veino-constriction au niveau des muscles inactifs et des organes ne participant pas à l'effort ainsi qu'au niveau des reins.

L'extraction sanguine dans les muscles est amélioré par l'augmentation du rendement de dissociation de l'oxyhémoglobine induite par une augmentation de l'acidité, de la température et de la concentration de gaz carbonique liées à l'effort. Son rendement passe de 25% à 70-80% pendant un exercice.

2.6. Production de chaleur pendant l'effort (11)

Pendant l'effort 75% de l'énergie chimique développée est transformée en chaleur proportionnellement à l'intensité de l'exercice. Cette augmentation de température a pour conséquence d'améliorer les performances à l'effort : la conduction nerveuse, l'arrivée de l'O2 jusqu'au muscle (rendement de dissociation de l'hydroxy hémoglobine) et la viscosité musculaire qui augmente les capacités contractiles des muscles. C'est pour cela qu'il est nécessaire de bien échauffer le corps avant un exercice et qu'il existe un mécanisme qui permet de maintenir la température corporelle à une valeur d'équilibre avoisinant les 37°C. Celui-ci est contrôlé par l'hypothalamus qui perçoit les variations de la température sanguine.

Il y a deux alternatives physiologiques avec effets concomitants : l'évaporation de la sueur au niveau cutané grâce aux glandes sudoripares et la vasodilatation des capillaires sous-cutanés, permettant un rafraichissement du sang dans les réseaux capillaires sous-cutanés. La conséquence de cette thermorégulation au cours d'exercices longs est d'importantes pertes hydriques entrainant une perte d'électrolytes, qui doivent impérativement être compensés par une hydratation adéquate. (11)

2.7. Adaptation endocrinienne (11)

Pendant un effort il est nécessaire d'augmenter l'apport en glucose vers les muscles, pour cela il y a une augmentation de la glycolyse, lipolyse et de la néoglucogenèse.

Pour augmenter la néoglucogenèse il faut augmenter la concentration plasmatique en cortisol qui a une activité anti-inflammatoire qui diminue la douleur et retarde le seuil de la fatigue.

Les hormones hypophysaire GH ont pour rôles de sauvegarder le métabolisme au cours d'exercices qui se prolongent et restaurer des systèmes au cours de la récupération. L'augmentation de la concentration plasmatique de GH se fait à partir de 40minutes d'exercice. Les effets pendants l'effort sont l'induction de la lipolyse par blocage de l'action de l'insuline pour réserver le glucose indispensable au système nerveux et l'orientation du métabolisme musculaire vers l'utilisation des lipides en stimulant la libération d'acides gras par les adipocytes. Après l'effort, GH active la croissance ou la réparation osseuse et induit des synthèses protéiques et augmente la masse musculaire.

La concentration plasmatique d'hormones thyroïdiennes augmentent pendant l'effort, elles ont pour rôles d'augmenter la consommation d'oxygène et le catabolisme énergétique, stimuler la lipolyse, réguler la température centrale et entretenir le fonctionnement cérébral.

Les taux sanguins d'adrénaline et de noradrénaline si celui-ci a une intensité suffisante (entre 50 et 75% de la VO2max) augmentent durant l'effort. Leurs rôles est d'adapter le système cardiorespiratoire à l'effort par l'augmentation du niveau d'activité cardiaque, augmentation de l'absorption d'oxygène par une broncho-dilatation, augmentation du débit sanguin au niveau du muscle par vasodilatation locale au niveau musculaire et vasoconstriction au niveau des viscères, augmentation du retour veineux en baissant les résistances vasculaires systémiques, augmentation de la production de granulocytes (système de défense non spécifique), stimulation de la glycogénolyse et le taux de glucose sanguin et stimulation de la lipolyse.

La concentration plasmatique de l'aldostérone et ADH (hormone antidiurétique) diminue afin d'augmenter les résistances périphériques et la pression artérielle, réabsorber l'eau et le sodium et le potassium au niveau du rein.

Les concentrations d'endorphines libérées par l'hypothalamus et l'hypophyse lors de stress psychologique et physique sont augmentées lors d'activités de type aérobie supérieur à 45minutes. Ses effets sont : euphorisants, anxiolytiques, antalgiques, antifatigues.

2.8. Les facteurs limitants de l'effort

- Le débit cardiaque (Fcmax)
- Les capacités respiratoires (VO2max) : capacités de transport de l'oxygène aux muscles et capacités périphériques d'extraction de l'oxygène
- L'épuisement des réserves en glucose puis en glycogène
- L'acidose métabolique due à l'accumulation d'acide lactique dans les muscles
- Les capacités de thermorégulation et de régulation de la balance électrolytique
- La fatigue

La fatigue est l'incapacité à maintenir un travail musculaire à une intensité donnée. C'est la disparition avec l'arrêt de l'exercice et après une période de repos. Il y a plusieurs mécanismes en fonction de l'intensité de l'effort, du type de fibres musculaires recrutées, du niveau d'entrainement du sujet et de l'alimentation. (11)

La fatigue périphérique après un effort très court et très intense. C'est l'épuisement des stocks d'ATP issus du système ATP-PC. La fatigue est exclusivement musculaire, c'est aussi l'accumulation de phosphate inorganique (Pi), d'ADP et d'ions H+ dans les unités contractiles, l'acidose musculaire, la diminution de la sensibilité de la troponine aux ions Ca++ et l'incapacité du muscle à répondre au stimulus nerveux.

La fatigue centrale après un effort sub-maximal de plus d'une heure. C'est la diminution du glucose circulant destiné au Système Nerveux Centrale, hypoglycémie cérébrale et diminution de la transmission nerveuse ou neuromusculaire.

3. Les paramètres biologiques de l'effort

Il est important de les connaitre afin d'établir un programme en fonction de ses données et objectifs personnels. (11)

3.1. La fréquence cardiaque

C'est le nombre de pulsations par minute, mesuré au creux du poignet ou à l'aide d'un cardiofréquencemètre. Il y a la fréquence cardiaque de repos (FCR) : moyenne des fréquences cardiaques mesurées sur quelques jours au moment du réveil matinal, avant le lever et la fréquence cardiaque maximale (FCM) : fréquence cardiaque observée à l'issu d'un effort d'intensité maximale maintenu pendant quelques minutes. Elle peut aussi être estimée par un calcul en fonction du sexe et de l'âge de la personne. (FCM = 220-âge pour les hommes) (FCM = 226- âge pour les femmes).

3.2. Les seuils ventilatoires

Le seuil d'adaptation ventilatoire (SV1) ou seuil aérobie est le seuil à partir duquel la filière aérobie est sollicitée. Les échanges d'oxygène sont en équilibres et la consommation d'oxygène en fonction de l'intensité de l'effort augmente de manière linéaire.

Le seuil d'inadaptation ventilatoire (SV2) ou seuil anaérobie est le seuil à partir duquel les besoins en oxygène dépassent les capacités ventilatoires de l'individu. C'est une zone de discordance entre la forte augmentation de la ventilation et la faible augmentation de la consommation d'oxygène, elle est caractérisée par une augmentation de la concentration sanguine en lactate et une acidification du sang.

3.3. La consommation maximale d'oxygène : VO2 max

C'est la capacité maximale d'un individu à capter l'oxygène, à le transporter et à l'utiliser au niveau musculaire. Elle est exprimée en ml d'O2 par kilogramme de poids corporel et par minute (ml O2/kg/mn).

La PMA (Puissance Maximale Aérobie) en Watts est la puissance à laquelle la VO2 Max est atteinte. La VMA (Vitesse Maximale Aérobie) en km/h est la vitesse de course à laquelle la VO2max est atteinte.

La FCM est atteinte à la vitesse maximale aérobie (VMA), qui correspond à la puissance maximale aérobie, (PMA) et à la VO2max.

Le seuil aérobie est atteint entre 70% et 80% de la FCM, correspondant à 70% à 80% de la VO2max.

Le seuil anaérobie est atteint entre 85% et 90% de la FCM, correspondant à 85% à 90% de la VO2max.

3.4. Test d'évaluation des paramètres de l'effort

Le Test à l'effort se déroule sur tapis roulant à inclinaison constante de 3% pour compenser la résistance de l'air. Il y a des paliers successifs de 3 minutes d'intensité croissante (gain de 2Km/h à chaque palier) commençant à une vitesse d'échauffement. Cela permet de mesurer la fréquence cardiaque et la consommation d'O_2 en continu. La mesure de la concentration en lactate par prélèvement sanguin effectué au lobe de l'oreille. Le dernier palier est égal à la VMA et à la FCM pendant au moins deux minutes. (13)

Les exercices en endurance sont effectués en aérobie, c'est à dire en dessous de la VMA, PMA ou VO2max afin de développer les capacités aérobies.

L'endurance fondamentale se situe à 65-75 % de la fréquence cardiaque maximale ou de la charge maximale, elle permet de développer des capacités cardio-vasculaires et l'adaptation de l'organisme aux efforts de longue durée (au-delà de 30 minutes).

L'endurance soutenue se situe à 75-80% de la fréquence cardiaque maximale ou de la charge maximale, elle permet de développer la filière aérobie (meilleure utilisation de l'oxygène et meilleure élimination de l'acide lactique). C'est la zone d'entrainement prioritaire lorsque l'on recherche la performance.

Les exercices en résistances, en zone mixte ou en volume. La résistance est la capacité à endurer la fatigue pendant un temps relativement long (15-20 min). Les exercices sont effectués au seuil aérobie c'est à dire à la VMA, PMA, VO2max (utilisation de la filière anaérobie lactique). Le but est d'optimiser le recrutement des fibres musculaires de type IIa, avec production d'une quantité élevée de lactate à 80-90% de la fréquence cardiaque maximale ou de la charge maximale. C'est la zone d'entrainement intéressante pour préparer l'organisme à des efforts très intensifs.

Les exercices en force ou en vitesse. Ils se situent à 90-100 % de la fréquence cardiaque maximale ou de la charge maximale. Ces efforts très intensifs permettent de travailler à puissance maximale pendant des temps très brefs (2 minutes max). Ce sont des exercices dit en fractionnés ou en intervalles.

4. Adaptation à l'altitude

4.1. Composition de l'air

L'air est un mélange gazeux homogène constituant l'atmosphère de la Terre. Il est approximativement composé de 78,09% de diazote, 20,95% d'Oxygène, et moins de 1% d'autres gaz dont le dioxyde de carbone 0,05%, le méthane 0,000172% et des gaz rares dont principalement de l'argon 0.93% mais aussi du néon 0,0018%, krypton 0,00012%, xénon 0,00009%. (14)

Composants	%
O_2	20,95
CO_2	0.05
N_2	78,09
Agron	0,93

Tableau 2 : composants et composition gazeuse de l'air en %.

La proportion des différents composants de l'atmosphère est particulièrement stable, et ne varie pas en fonction de l'altitude, au moins dans la gamme d'altitude où la vie est possible (à très haute altitude, la composition de l'atmosphère dépend de la densité des gaz, et les gaz légers tels que l'hydrogène et l'hélium se trouvent en quantité plus importante). En effet, des courants de convection importants assurent un brassage des gaz bien au-delà de la limite de la vie possible.

La composition de l'air sec ne varie pas en fonction des conditions atmosphériques ou des saisons. Sauf environnement très particulier, la composition en gaz dans l'atmosphère est stable. L'élément qui varie dans la composition de l'air est la teneur en vapeur d'eau qui varie en fonction de la température et les conditions climatique. L'air contient une quantité plus ou moins importante de vapeur d'eau. La pression partielle de vapeur d'eau dans l'air est donc limitée par sa pression de vapeur saturante qui varie fortement avec la température. La pression de vapeur saturante est liée à la tendance des molécules à passer de l'état liquide (ou solide) à l'état gazeux : une substance possédant une pression de vapeur saturante élevée (vis-à-vis de la pression atmosphérique) à température ambiante est dite volatile. La pression de vapeur saturante d'une substance augmente de façon non-linéaire avec la température selon la relation de Clausius-Clapeyron.

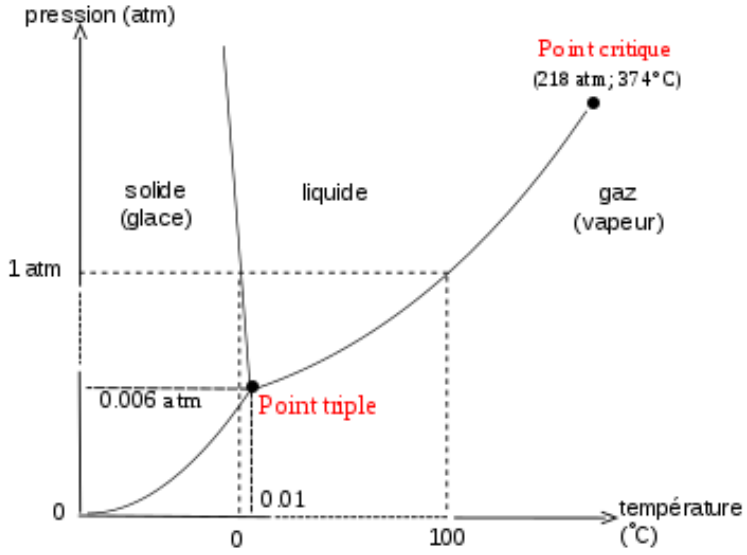


Figure 12 : relation de Clausius-Clapeyron.

Température	Pression de vapeur saturante
0°c	4,6 mmHg
37°C	47 mmHg

Tableau 3 : variation de la pression de vapeur saturante avec la température.

L'humidité relative est le pourcentage de la pression partielle en vapeur d'eau par rapport à la pression saturante. La pression atmosphérique au niveau de la mer est de 760 mm Hg (101,3 kPa). Par exemple, dans un poumon, la vapeur d'eau est égale à la pression de vapeur saturante, soit 47 mmHg. Par conséquent, la pression de l'air sec est de 760 – 47 = 713 mmHg. L'air sec contenant 21% d'oxygène, la PIO_2 (pression partielle en O_2) dans l'air inhalé est de 150 mmHg.

4.2. Effet de l'altitude sur la pression atmosphérique

Il n'y a pas avec l'altitude de variation de la composition de l'air, mais diminution exponentielle de la pression atmosphérique. (15)

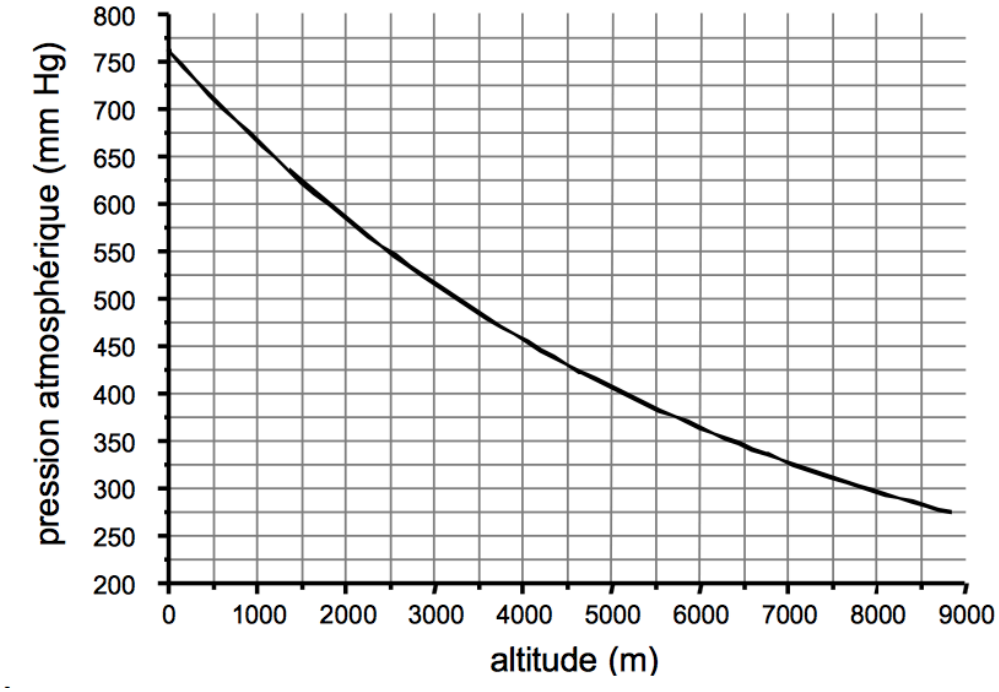


Figure 13 : variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.

À 3000 m, la pression atmosphérique est diminuée d'un tiers ; à 5500 m, elle est diminuée de moitié. Il s'ensuit que la pression partielle en oxygène de l'air est diminuée dans les mêmes proportions. Si l'on considère l'air inspiré, cette diminution est encore plus grande, car la pression de vapeur d'eau saturante ne diminue pas avec la pression barométrique. Certes, la pression de vapeur saturante diminue avec une diminution de la température, qui elle-même diminue lorsque l'altitude augmente. Mais pour le calcul de la PIO_2, c'est-à-dire de la pression partielle en oxygène de l'air inspiré, on doit prendre en compte non pas la température extérieure mais la température corporelle. Pour les homéothermes, pour l'homme cette température ne varie pas en fonction de l'altitude.

Par rapport à la pression atmosphérique, la proportion de vapeur d'eau dans l'air inhalé est donc plus importante en altitude qu'au niveau de la mer, ce qui diminue la proportion des autres gaz, en particulier d'oxygène et le CO_2.

pressions (en mmHg)	niveau de la mer	5500 m	différence
pression atmosphérique	760	380	380
PO_2	160	80	80
PIO_2	150	70	80
PCO_2	0,23	0,11	0,12
$PICO_2$	0,21	0,11	0,11

Tableau 4 : pressions et pressions partielles des principaux gaz en fonction de l'altitude.

4.3. Conséquences physiques sur les pressions, les concentrations en oxygène et en CO_2 dans l'organisme

4.3.1. Pression alvéolaire

Les variations de la pression partielle en dioxyde de carbone dans l'air inhalé sont négligeables, de même que leurs conséquences sur la pression alvéolaire, qui est déterminée par le débit artériel (Va) et la production de CO_2 par l'organisme. Toute chose étant égale par ailleurs, c'est-à-dire en absence de modification physiologique de la respiration, la $PACO_2$ est inchangée en altitude.

$$PACO_2 = (V°CO_2/V°A)\ K$$

K : constante, $V°CO_2$: débit de CO_2 produit, V°A : débit alvéolaire

NB : la notation V° désignera un débit

Il n'en est pas de même pour la PO_2 alvéolaire, qui dépend de la PIO_2. La PO_2 alvéolaire peut être calculée à partir de la formule suivante :

$$PAO_2 = (PIO_2 - (PACO_2/R) + F$$

R : quotient respiratoire, F : constante

Puisque la pression alvéolaire en CO_2 n'est pas modifiée lorsque l'altitude augmente, mais que la PIO_2 diminue, il s'ensuit que la pression alvéolaire en O_2 diminue en altitude.

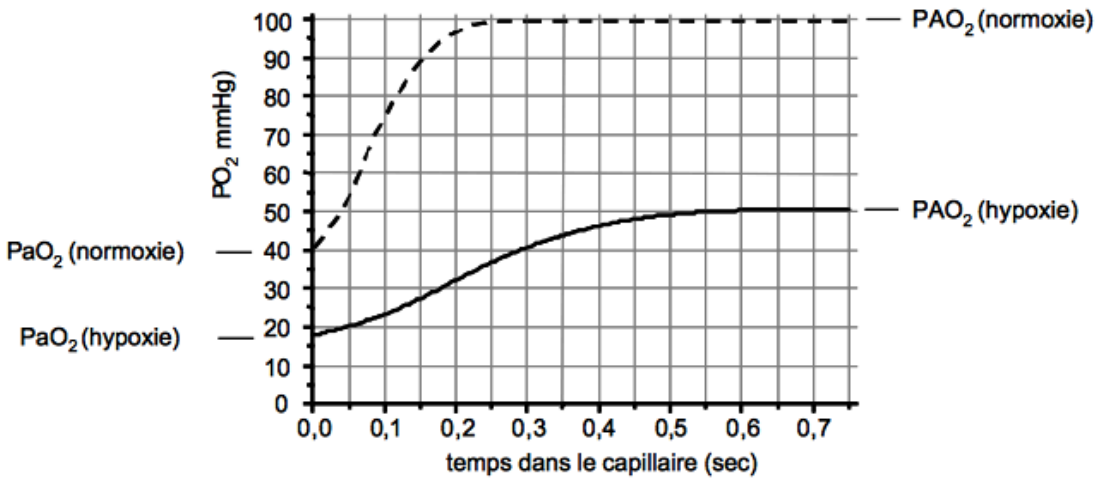


Figure 14 : PO2 dans le sang, en fonction du temps de passage dans le capillaire, en fonction de la PAO2 (trait plein : hypoxie ; trait pointillé : normoxie)

La diffusion alvéolaire dépend du gradient de concentration entre la pression alvéolaire et la pression artérielle en oxygène. En altitude, la diminution de la pression alvéolaire entraine une diminution du gradient de concentration en oxygène de part et d'autre de la barrière alvéolo-capillaire, ce qui entraine une diminution de la vitesse d'équilibre des pressions partielles. Au repos, le temps de passage moyen d'un globule rouge dans un capillaire pulmonaire est de 0,75 sec. Ce temps est suffisant pour que la pression partielle en oxygène dans le sang capillaire s'équilibre avec la pression partielle alvéolaire en oxygène. Cependant, si le débit sanguin augmente de manière importante, par exemple lors qu'un exercice physique intense, il peut arriver que l'équilibre ne soit pas obtenu. En effet, le temps de passage dans le capillaire pulmonaire peut être réduit à 0,25 sec. C'est un des rares cas où le transfert de l'oxygène n'est plus limité par la perfusion mais par la diffusion, même si la perméabilité de la paroi alvéolo-capillaire demeure normale. Ce phénomène peut être aggravé par une diminution de la perméabilité alvéolo-capillaire provoquée entre autres par un sub-oedème pulmonaire induit par l'altitude. (16)

4.3.2. Pression partielle et concentration dans le sang

La diminution de la pression alvéolaire en oxygène se traduit par une diminution de la pression partielle en oxygène dans le sang artériel. Ceci influence la quantité d'oxygène présente dans le sang, mais pas de manière linéaire, entant donné que la plus grande quantité de l'oxygène se trouve fixée à l'hémoglobine. La quantité d'O_2 présente dans le sang en ml O_2/100 ml de sang est donnée par la formule :

$$(1{,}39 \times Hb \times (Sat/100)) + 0{,}003\ PO_2$$

Hb : concentration en hémoglobine du sang (en g/100 ml)
Sat : % de saturation de l'hémoglobine
PO_2 en mmHg

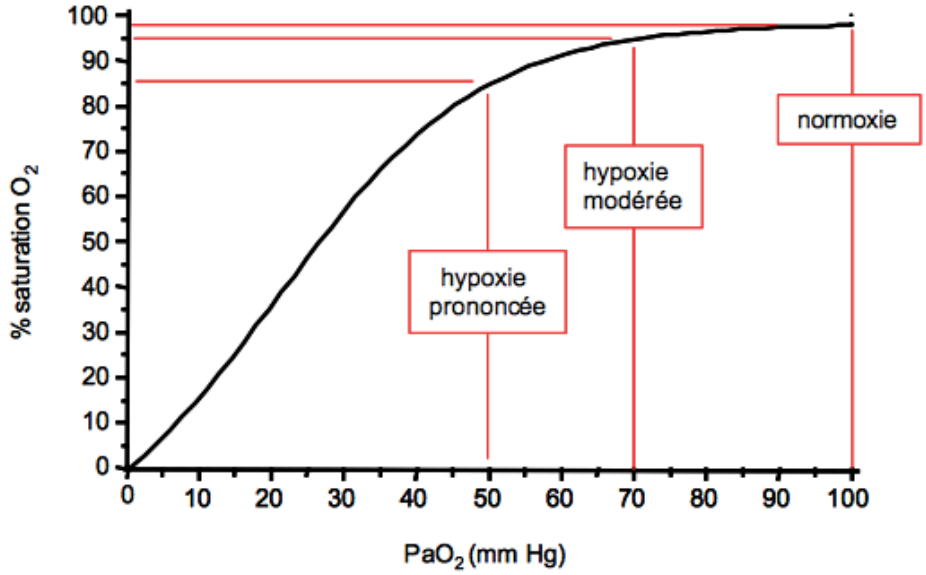


Figure 15 : courbe de saturation de l'hémoglobine.

La PO_2 n'influence directement que faiblement la quantité d'oxygène présente dans le sang, la majeure partie dépend de la saturation de l'hémoglobine. La courbe de saturation montre que tant que la PO_2 reste supérieure à 70 mmHg environ, la répercussion de la baisse de la PO_2 sur la quantité en oxygène du sang est faible, le pourcentage de saturation entant porche de 100 %. Au-delà de 70 mmHg, la diminution de la PaO_2 entraine une diminution significative du pourcentage de saturation de l'hémoglobine, et donc de la quantité d'oxygène présente dans le sang.

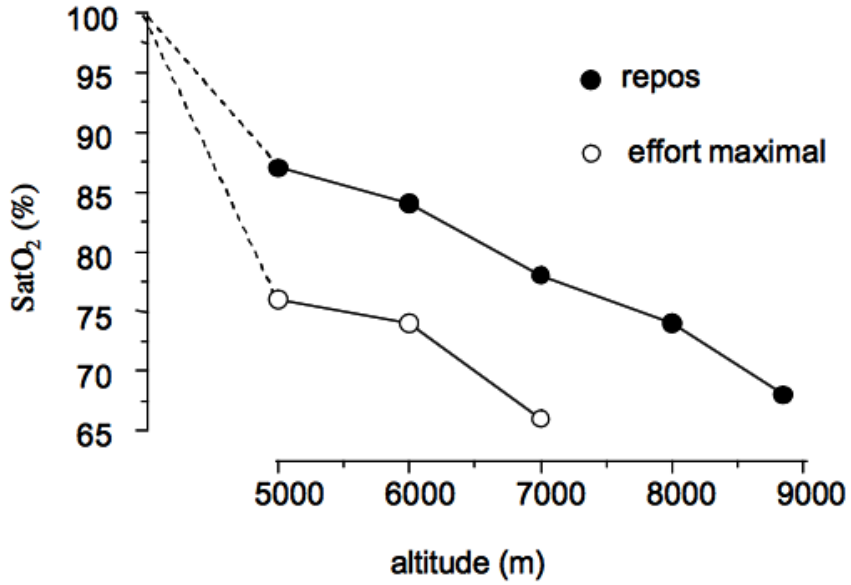


Figure 16 : variations de la saturation artérielle en oxygène en fonction de l'altitude, au repos et à l'exercice maximal. Source : Richalet & Herry, Médecine de l'alpinisme, Paris, Masson, 1999.

Comme on peut le constater sur la courbe au repos du tableau précèdent, la saturation en O_2 du sang artériel diminue avec l'altitude. À l'effort, le pourcentage diminue par rapport au repos, car l'équilibre des pressions entre alvéole et sang capillaire n'est pas atteint. (17)

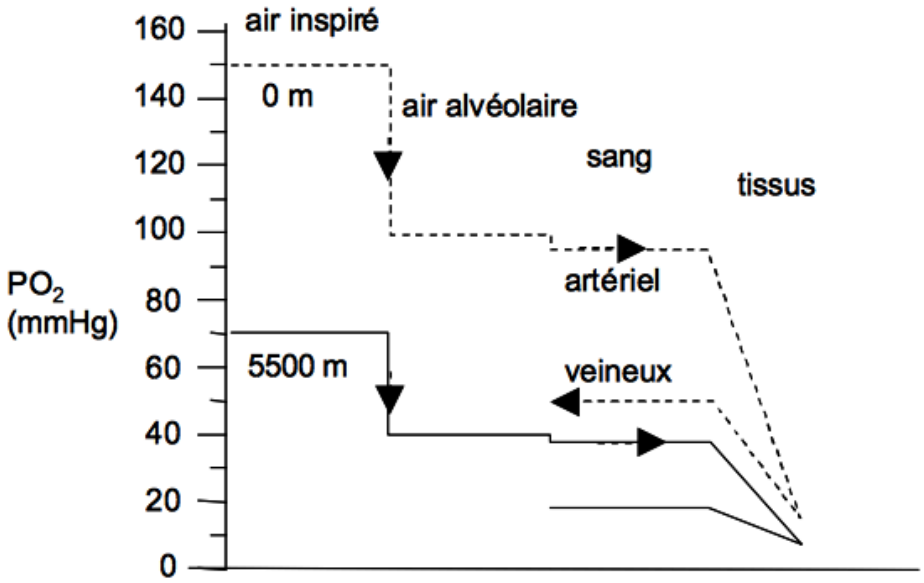


Figure 17 : pressions partielles en oxygène, de l'air inspiré aux tissus, au niveau de la mer et à 5500 m d'altitude. Source : Richalet & Herry, Médecine de l'alpinisme, Paris, Masson, 1999.

L'oxygénation des tissus dépend des gradients de pression partielle en oxygène, selon la loi de la diffusion de Fick (définit par Adolf Fick en 10985, elle décrit la diffusion de matière dans un milieu binaire). En altitude, les gradients de pression sont diminués à chaque étape, ce qui entraine une hypoxie tissulaire.

A propos du dioxyde de carbone, l'altitude n'a aucun effet significatif sur la pression alvéolaire en CO_2, il n'y a pas non plus d'effet direct significatif sur la pression partielle ni la quantité CO_2 dans le sang. Cependant, l'apparition des réponses physiologiques aura des conséquences importantes sur la quantité de CO_2 dans le sang.

Donc, les principaux effets de l'altitude sont une diminution de la pression partielle et de la concentration en oxygène dans le sang artériel, sans modification des grandeurs concernant le CO_2. Cette diminution ne s'observe qu'à partir d'une baisse significative de la pression atmosphérique, correspondant à une pression alvéolaire en oxygène de l'ordre de 70 mmHg.

Cette hypoxémie d'altitude va entrainer une hypoxie tissulaire, et va donc avoir de grandes conséquences sur le métabolisme de l'organisme. De plus, comme les valeurs de PO_2 artérielle et la concentration sanguine en

oxygène sont des variables intervenant dans la régulation de l'appareil cardio-respiratoire, le fonctionnement de celui-ci va être modifié. Pour l'oxygène, ce qui se passe en altitude ressemble à ce qui se passe lors d'hypoventilation (baisse de la pression alvéolaire) ou lors de l'augmentation de la consommation d'oxygène par l'organisme, dans le cas d'exercice par exemple. Dans ces deux cas, l'hypoxémie est associée à une hypercapnie, soit par diminution de l'élimination du CO_2 (hypoventilation), soit par augmentation de sa production (augmentation du métabolisme), alors que ce n'est pas le cas dans l'hypoxie d'altitude. (18)

4.4. Conséquences physiologiques sur le fonctionnement de l'appareil respiratoire des personnes vivants en basse altitude

4.4.1. Effets à court terme (1-3 jours)

Les variables PO2, et PCO2 sont régulées grâce à des capteurs rénaux, centraux et chémorécepteurs périphériques. Les différents effecteurs sont la ventilation, débit sanguin, résistance vasculaire, et érythropoïèse.

Dès l'arrivée en altitude, on peut observer une augmentation de la fréquence cardiaque due à la stimulation des récepteurs β-adrénergiques des cellules cardiaques. La stimulation de ces récepteurs est sensible à l'augmentation de l'adrénaline (par activation du système sympathique).

En hypoxie aiguë, il y a donc une augmentation de la fréquence cardiaque à l'exercice et au repos alors qu'en hypoxie chronique (après 2 à 3 semaines), la fréquence cardiaque au repos et à l'exercice va diminuer. Cela est dû à une désensibilisation des récepteurs β-adrénergiques: c'est un autre des mécanismes de l'acclimatation.

variables régulées	capteurs	effecteurs
PO_2	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PO_2 concentration en O_2	capteurs rénaux	érythropoïèse
PCO_2	chémorécepteurs périphériques	ventilation débit sanguin résistances vasculaires
PCO_2	chémorécepteurs centraux	ventilation

Tableau 5 : les principales boucles de régulation intervenant dans la respiration.

La diminution de la PO_2 artérielle va activer les chémorécepteurs sensibles à l'oxygène, présents essentiellement au niveau des glomus carotidiens. Les cellules de type I des glomus carotidiens sont très sensibles à la pression partielle en oxygène, et une diminution de 15% de celle-ci suffit à les activer ; elles ne sont pas sensibles à la concentration en oxygène, à la différence des cellules productrices d'érythropoïétine, qui sont sensibles à la PO_2 et à la concentration en oxygène du sang.

L'activation des chémorécepteurs va entrainer une hyperventilation reflexe, avec augmentation de la fréquence respiratoire et du volume courant. D'autre part, l'activation des chémorécepteurs va stimuler l'appareil cardio-circulatoire, provoquant une tachycardie et une augmentation du débit sanguin. Cette hyperventilation va avoir plusieurs conséquences, sur la quantité d'oxygène dans l'organisme, mais aussi sur la quantité de CO_2, ce qui va mettre secondairement en jeu d'autres systèmes de régulation.

L'hyperventilation va entrainer une augmentation de la PO_2 alvéolaire, qui dépend à la fois de la PO_2 inspirée et de l'extraction de l'oxygène par le sang. Ceci va entrainer une augmentation de la PO_2 artérielle et donc, une meilleure oxygénation des tissus, à laquelle participe également l'augmentation du débit sanguin due à la tachycardie. De ce point, l'hyperventilation et la tachycardie engendrées par la stimulation des chémorécepteurs à l'oxygène est une réponse adaptée, puisqu'elle est favorable à l'organisme. (15)

L'hyperventilation va avoir une autre conséquence, la diminution de la pression partielle et de la concentration en CO_2 dans le sang. En effet, elle va augmenter l'élimination de CO_2 au niveau des poumons. Cette hypocapnie va avoir plusieurs conséquences, liées d'une part directement à la diminution de la PCO_2, et d'autre part liées à la perturbation de l'équilibre acido-basique du sang, l'hypocapnie entrainant une alcalose par le mécanisme suivant :

$$H_20 + CO_2 \Leftrightarrow H_2CO_3 \Leftrightarrow H^+ + HCO_3^-.$$

Cette alcalose respiratoire inhibe les chémorécepteurs centraux, ce qui va permettre une autolimitation de la réponse ventilatoire.

L'hypocapnie et l'alcalose vont jouer sur les chémorécepteurs sanguins et périphériques sensibles au CO_2. La réponse liée aux récepteurs périphériques, sensibles directement au pH et à la PCO_2 sanguine, est immédiate ; celle liée aux récepteurs centraux, sensibles aux variations du liquide extracellulaire cérébral (LEC) dans lequel ils se trouvent, est plus lente, mais toutefois plus importante. En effet, le pH du LEC dépend de celui du liquide céphalo- rachidien (LCR) qui n'est pas tamponné de manière aussi efficace que le sang. Les variations de pH sont donc plus importantes au niveau du LEC que du sang.

L'activation de ces récepteurs va entrainer une diminution de la ventilation, induisant en retour une diminution de la PO_2 alvéolaire, puis artérielle. Il y a là la mise en jeu de deux boucles de régulation qui conduisent à des résultats opposés. La conséquence en est une hyperventilation cyclique, associée à une alcalose plus ou moins importante selon les individus. En l'occurrence, il ne s'agit pas là d'une réponse adaptée, dans la mesure où elle est défavorable à l'organisme, d'une part en limitant l'hyperventilation et donc l'oxygénation des tissus, d'autre part en induisant une alcalose néfaste, voire mortelle, pour l'organisme. Au sommet du Sagarmata (Everest), le pH peut atteindre des valeurs de 7,6 à 7,7. Pendant le sommeil peuvent survenir des pauses ventilatoires d'une vingtaine de secondes.

A propos de la courbe de dissociation de l'oxygène, dans un premier temps, la courbe de saturation est déplacée vers la gauche, déplacement dû à l'effet du pH sur l'affinité de l'oxygène pour l'hémoglobine (effet Bohr, l'effet Bohr est la diminution de l'affinité de l'hémoglobine pour l'oxygène (O_2) lors d'une augmentation de la pression partielle en dioxyde de carbone (CO_2) ou d'une diminution de pH). Puis la courbe de dissociation Hb-O_2 est légèrement déplacée vers la droite. Ceci n'est pas dû à un effet Bohr. L'alcalose aurait pour conséquence un déplacement de la courbe vers la gauche mais la production accrue de 2,3 diphosphoglycérate (DPG) dans les hématies, entraine un déplacement de la courbe vers la droite. Cette diminution d'affinité favorise la libération d'oxygène au niveau tissulaire, mais diminue sa captation au niveau alvéolo-capillaire, en diminuant le pourcentage de saturation de l'hémoglobine. Il semblerait qu'un déplacement vers la gauche de la courbe Hg-O_2 est favorable à l'évolution de cette adaptation. C'est ce qui est observé chez les espèces génétiquement adaptées à l'altitude.

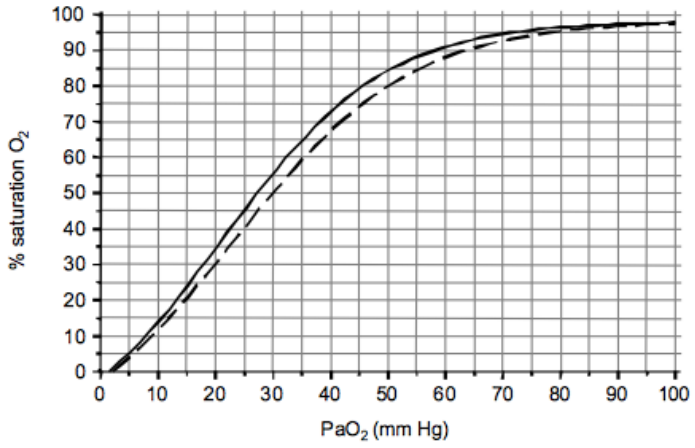


Figure 18 : courbe de saturation de l'hémoglobine au niveau de la mer (courbe pleine) et à 3500m d'altitude (exemple la Paz) (courbe en pointillés).

En ce qui concerne les effets sur la circulation pulmonaire et plus précisément la vasoconstriction hypoxique plusieurs conséquences sont observables.

Cette réponse consiste en une contraction des muscles lisses de la paroi des artérioles situées dans la zone hypoxique, due à une action locale de l'hypoxie sur l'artère pulmonaire elle-même. Cette vasoconstriction hypoxique est due à la diminution de la PO_2 alvéolaire, et non pas à une diminution de la PO_2 artérielle qui pourrait être consécutive à la diminution de la PO_2 alvéolaire. La réponse hypoxique se produit y compris lorsqu'on perfuse un poumon avec un sang à PO_2 élevée tout en maintenant une PO_2 alvéolaire basse.

Dans le cas d'hypoxie localisée, la vasoconstriction hypoxique, en augmentant les résistances vasculaires, a pour effet de dévier le débit sanguin des zones pulmonaires hypoxiques vers les zones pulmonaires plus oxygénées. Lors d'une hypoxie localisée, par exemple lors d'obstruction bronchique, l'irrigation de cette zone hypoxique se fait « à perte », le sang passant dans cette zone ne pouvant se charger correctement en oxygène (effet shunt). La vasoconstriction hypoxique, en dérivant localement le débit sanguin, réduit les effets néfastes de l'hypoxie localisée sur les échanges gazeux.

La pression artérielle systémique varie peu en altitude. Cependant la pression artérielle pulmonaire augmente avec l'altitude en quelques minutes et se stabilise en 12 à 24 heures. À 4500 mètres, sa valeur est multipliée par deux par rapport au niveau de la mer. L'augmentation de la pression artérielle pulmonaire créée par une vasoconstriction pulmonaire hypoxique, entraine une Hyper Tension Artérielle Pulmonaire (HTAP). Cette HTAP est particulièrement présente en position allongée, lors des périodes de sommeil et s'accentue avec l'altitude, la vitesse d'ascension, l'effort et le froid.

Ceci a un double effet : d'une part l'uniformisation du débit sanguin à l'intérieur du poumon avec recrutement capillaire, ce qui augmente les zones d'échanges gazeux dans le poumon. Cet effet peut être considéré comme favorable. Cependant, ce recrutement capillaire serait possible sans augmentation importante de la pression artérielle globale. L'augmentation de débit lié à la tachycardie suffit à priori à induire un recrutement capillaire. D'autre part, l'augmentation du travail du cœur droit joue un rôle important. L'augmentation de pression entraine une augmentation de la post charge cardiaque droite. Cette vasoconstriction se traduit par une augmentation des résistances pulmonaires sans variation du débit sanguin pulmonaire, qui est imposé par le débit sanguin systémique (la totalité du sang passe dans le poumon, quelle que soit la pression artérielle pulmonaire). L'hypertension artérielle est parfois associée à un œdème aigu du poumon, une des pathologies induites par l'altitude.

De plus, lors de l'arrivée en altitude, vers 3500 mètres environ, il y a plusieurs modifications concernant le sommeil : une augmentation de la latence d'endormissement, une diminution du temps de sommeil lent et profond, une augmentation du nombre de réveils intermittents et une conservation du sommeil paradoxal. Ces

modifications vont avoir tendance à augmenter le temps total de sommeil. D'autre part, une respiration périodique peut apparaitre lors de la période de sommeil. Ce sont des pauses de la respiration pendant des périodes pouvant durer entre 8 et 20 secondes. La ventilation périodique est favorisée pour les sujets ayant une forte réponse ventilatoire à l'hypoxie et à l'hypercapnie. Elle est défavorable car la ventilation et la saturation en oxygène vont être maintenues.

Concernant les fonctions cérébrales, lorsqu'une certaine altitude est atteinte, on peut observer des modifications comportementales dues à un ralentissement des fonctions cérébrales telles que des difficultés d'écriture, une perte de logique (à partir de 5000 mètres), jusqu'à une perte de connaissance possible (6000/7000 mètres). À partir de 8000 mètres, les moments de conscience sont rares. L'hypocapnie découlant de l'hypoxie due à l'altitude entraine une vasoconstriction puissante au niveau cérébral. Ce phénomène va directement mener à une diminution de l'apport en oxygène par le sang jusqu'au cerveau. Le cerveau utilisant 20% de l'oxygène disponible au repos pour son fonctionnement, certaines fonctions cérébrales diminuent rapidement lors d'une montée en altitude.

4.4.2. Pathologies aigues liées à l'altitude.

Les pathologies liées à l'altitude ne sont pas toutes induites par ses effets sur l'appareil respiratoire. Ces diverses manifestations sont en général classées de la manière suivante :

- Le mal aigü des montagne bénin (MAM) ou maladie de Monges. Les signes d'appels bénin du MAM : maux de tête (96 % des cas), une fatigue importante, des troubles importants du sommeil (35 % des cas), des vertiges, une perte d'appétit et des nausées, vomissement, dyspnée d'effort, diminution de la diurèse, une irritabilité, asthénie, lassitude, trouble neurologique.
- L'œdème localisé de haute altitude (OLHA). Considéré comme les complications graves du MAM si la personne poursuit sa progression en altitude malgré les signes d'appels.

Le MAM touche plusieurs catégories de populations : les populations vivant en haute altitude, les alpinistes, les touristes se rendant dans des villes et villages de haute altitude (exemple : Lhassa (Tibet) à 3650 mètres : visite de forêts et villages) ou encore des travailleurs (exemple : Centre minier de Cerro de Pasco (Pérou) à 4350m).

Les facteurs de risque du MAM sont les suivants : (15)

- Facteur dépendant du terrain (rapidité d'ascension, altitude du séjour absolue, durée du séjour),

- Facteur dépendant de l'individu (antécédents de mal d'altitude, antécédents de migraine, altitude de résidence inferieure à 900 mètres, âge inferieur à 50 ans, obésité, volume crânien réduit, moins bonne sensibilité aux chémorécepteurs,
- Facteur dépendant de l'ascension (intensité de l'effort physique, anxiété, déshydratation).

Contrairement à la croyance populaire, une bonne préparation et condition physique au niveau de la mer ne sont pas des facteurs protecteurs contre les pathologies de haute altitude.

La physiopathologie du MAM :

- Une augmentation du Débit Sanguin Cérébral (DSC)
- Une modification de la perméabilité vasculaire par altération de l'autorégulation vasculaire, augmentation de la perméabilité endothéliale et altération de la pompe Na^+/K^+ sur la cellule cérébrale
- Une rétention hydro-sodée favorisant l'œdème dans tous les territoires.

Ces 3 phénomènes concourent à la création d'un œdème vasogénique (interstitiel) dû à l'augmentation de la perméabilité vasculaire au niveau des cellules endothéliales. C'est cet œdème qui serait à l'origine des signes cliniques du MAM.

Le Mal aigü des montagnes compliqué :

- L'œdème pulmonaire de haute altitude (OPHA)
- L'œdème cérébral de haute latitude (OCHA)

L'OCHA est la cause principale des décès dans les expéditions de haute altitude. Il apparait dans la majorité des cas dans les 3 premiers jours du séjour en général à des altitudes à plus de 4000 mètres. L'OCHA est présent dans 1 à 2 % des cas de MAM. Une perte de connaissance apparait dans 50 % des cas, et lorsque le coma s'installe, l'issue est fatale une fois sur deux. (16)

Les facteurs de risques sont les mêmes que pour le mal aigu des montagnes.

Les signes cliniques de l'OCHA vont découler d'un syndrome de type hypertension intracrânienne :

- Vomissements brutaux (en jet)
- Maux de tête violents non calmés par les antalgiques
- Paralysie et/ou ataxie (démarche ébrieuse, performances psychomotrices altérées)
- Troubles de la vision (diplopie, vision floue)
- Désorientation temporo-spatiale

- Phénomènes pseudo-hallucinatoires
- Troubles de la coordination des mouvements
- Syndrome pseudo-dépressif

Ces troubles sont aggravés par l'effort à glotte fermée (en apnée), la toux et la position allongée. L'évolution de l'OCHA est le coma, et lorsque le coma est installé, la mort survient une fois sur deux.

La physiopathologie de l'OCHA repose sur les mêmes mécanismes que celle du MAM :

- L'hypoxémie crée une réaction de vasodilatation cérébrale avec une augmentation du DSC, créant à son tour une légère hausse de la pression intracrânienne

- Un défaut de perfusion sanguine cérébrale est observé, entrainant une augmentation de la perméabilité des barrières : les différents symptômes de l'OCHA sont dus à la différence de territoire atteint par ce défaut de perfusion (vue, équilibre, paralysie faciale, désorientation...).

Ces deux mécanismes concourent à l'augmentation du volume cérébral, et donc à l'apparition de l'œdème cérébral.

L'œdème pulmonaire de haute altitude survient lorsque les réactions de vasoconstriction sont trop importantes. Contrairement à l'OCHA, l'OPHA peut se développer sans signe de MAM préexistant. Il apparait après un délai minimum de 6 heures à une altitude supérieure à 3000 mètres, mais nécessite généralement quelques jours (2 à 4) pour se développer. L'OPHA est la première cause de décès des maladies aigues liées à la haute altitude.

L'OPHA touche 0,5 à 2 % des personnes se rendant à une altitude supérieure à 3000 mètres, et ce taux peut atteindre 10 % quand il s'agit de personnes confrontées à la haute altitude sans transition.

L'OPHA est une urgence vitale : 44 % des sujets atteints d'OPHA et qui sont non traites meurent. Cependant, l'évolution est très favorable et sans séquelles lors de la redescente ou de la réoxygénation.

Les signes cliniques de l'OPHA apparaissent 24 à 72 heures après l'arrivée en haute altitude. Ils sont dans 14 % des cas associés aux signes d'OCHA. On retrouve :

- Une dyspnée de repos ou de moindre effort
- Une tachypnée
- Une tachycardie
- Une toux séchée qui va devenir grasse avec des crachats mousseaux rosés
- Un état subfébrile et/ou une fatigue

- Une cyanose : les lèvres et les oreilles sont bleues

Les facteurs de risque de l'OPHA sont les mêmes que ceux du MAM et de l'OCHA. Cependant, d'autres facteurs de risques ont pu être établis pour l'OPHA :

- Facteurs dépendant de l'individu comme la prédisposition individuelle, l'âge jeune, le sexe masculin, une infection concomitante des voies aériennes, des anomalies préexistantes de la circulation pulmonaire, trisomie 21.
- Facteurs dépendant du terrain comme le froid
- Facteurs dépendant de l'ascension comme le phénomène de réentrée, l'accès rapide à l'altitude sans acclimatation, l'exercice intense

Les principaux éléments de la physiopathologie de l'OPHA seraient : (16)

- La vasoconstriction pulmonaire hypoxique (VPH) *:* En entrainant une augmentation de pression, la VPH pourrait entrainer un passage du liquide sanguin à travers la paroi endothéliale lésée dans les alvéoles pulmonaires
- La rétention hydrique : l'altitude entraine une augmentation du volume sanguin total, lié à une diminution de la diurèse et une vasoconstriction périphérique liée au froid. Ceci induit une augmentation du volume circulant intra-pulmonaire se traduisant par un passage du liquide hors des vaisseaux sanguins et au niveau du poumon
- La lésion de la membrane alvéolo-capillaire : trouble de la perméabilité vasculaire
- Syndrome inflammatoire : les lésions endothéliales pourraient être dues à un effet direct de l'hypoxie et/ou à l'action de médiateurs de l'inflammation. En effet, des médiateurs de l'inflammation, en particulier les leucotriènes, sont souvent retrouvés en forte concentration dans le liquide de lavage broncho-alvéolaire de sujets présentant un OPHA. En ce qui concerne l'épithélium, l'hypoxie modifierait ses propriétés de réabsorption d'eau de l'espace alvéolaire vers le milieu interstitiel. En effet, la réabsorption d'eau est due à l'activité de la pompe Na-K- ATPase au pôle basal des pneumocytes de type 2, l'extrusion active par la pompe de Na^+ dans l'interstitium induisant un passage passif para cellulaire d'eau. Or, l'activité de la pompe Na-K-ATPase est fortement diminuée par l'hypoxie.

Une grande variabilité individuelle est présente dans la réponse, ce qui fait que les conséquences pathologiques des réponses défavorables, et donc la tolérance à l'altitude, varie selon les individus. Les troubles lies aux

réponses inadaptées correspondent au mal aigu des montagnes (MAM), qui dans ses formes graves peut entrainer la mort par œdème aigu du poumon et/ou œdème cérébral.

Dans les conditions standard, l'hypoxémie et l'hypercapnie vont en général de pair, alors que ce n'est pas le cas en hypoxie d'altitude. Ceci explique que les boucles de régulation mises en jeu dans l'hypoxie amènent à des réponses physiologiques contradictoires, ce qui n'est pas le cas en conditions standard.

D'autres pathologies peuvent être observés :

- Des œdèmes périphériques peuvent survenir au niveau de la face et des extrémités (poignet, cheville). Ils sont plus fréquents chez la femme. Ces œdèmes sont dus à un défaut d'acclimatation : une rétention hydrique apparait, se traduisant par une prise de poids. L'apparition de ces œdèmes est favorisée par la pratique d'un effort physique et est très souvent associée au MAM. Cette pathologie est bénigne, donc ne nécessite pas de traitement.
- Des variations psychoaffectives : Au-delà de 5000 mètres d'altitude, un comportement dépressif, obsessionnel ou compulsif peut apparaitre. Le sujet aura tendance à s'isoler et à attacher une très grande importance aux détails matériels.
- Des accidents thronboemboliques : hémorragies rétiniennes, elles sont assez rares, ne surviennent pas avant 5000 mètres d'altitude et sont considérées comme graves au-delà de 7000 mètres d'altitude (séquelles). Le plus souvent, elles sont asymptomatiques. Le mécanisme d'action relève d'une hypertension intraoculaire et les symptômes sont une baisse de l'acuité visuelle (si atteinte maculaire), et des lésions oculaires. Un fond de l'œil permet de mettre en évidence un œdèmes papillaire associé. L'Accident vasculaire cérébral peut aussi arriver en altitude mais plutôt rare. Il survient surtout en altitude, chez les sujets jeunes et sans antécédents particuliers.

4.4.3. Effets à moyen et long terme (2-3 jours à 3-4 semaines)

Au bout de 2 à 3 jours, l'alcalose sanguine et cérébrale diminue, d'une part par la mise en jeu de systèmes tampon au niveau du LCR, d'autre part par l'élimination rénale de bicarbonates. Le pH sanguin se stabilise à une valeur physiologique, bien que l'hypocapnie persiste. La diminution du pH diminue la stimulation des chémorécepteurs sensibles au CO_2 et au pH, ce qui a pour conséquence une régularisation de la respiration, avec une hyperventilation stable. Ceci se traduit par une élévation de la PO_2 et une diminution de la PCO_2 alvéolaires. Comme la densité de l'air est plus faible en altitude, l'hyperventilation est facilitée par rapport aux conditions atmosphériques standard.

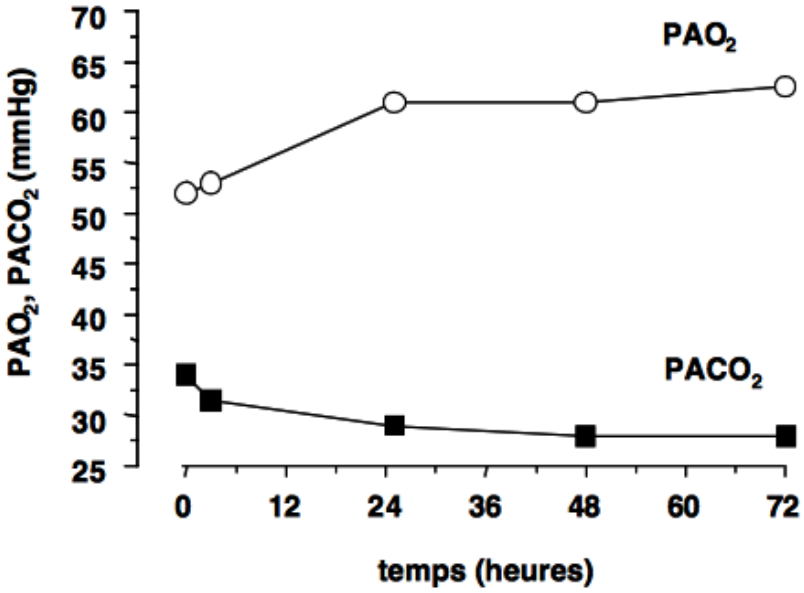


Figure 19 : évolution des PO2 et PCO2 alvéolaires au cours du temps lors d'un séjour en altitude

De plus, l'organisme réagit à l'hypoxie par une augmentation de l'érythropoïèse. Celle-ci est induite par la production d'érythropoïétine, produite au niveau du rein. Les cellules productrices d'EPO se situent dans le rein au niveau péritubulaire, à l'interface entre le cortex et la médullaire externe. Les cellules productrices d'EPO sont des fibroblastes. Cette stimulation de l'érythropoïèse a lieu dès les premières heures en altitude, augmente rapidement pendant 3 à 4 jours, puis décroit, tout en se maintenant à un niveau supérieur à la normale puis est perdu après un retour de 2 semaines en plaine. (19)

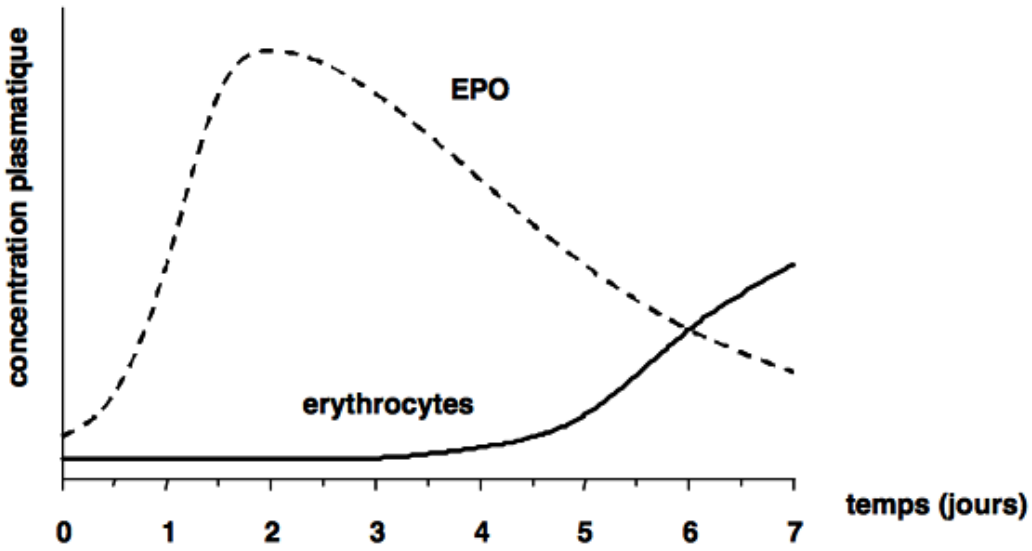
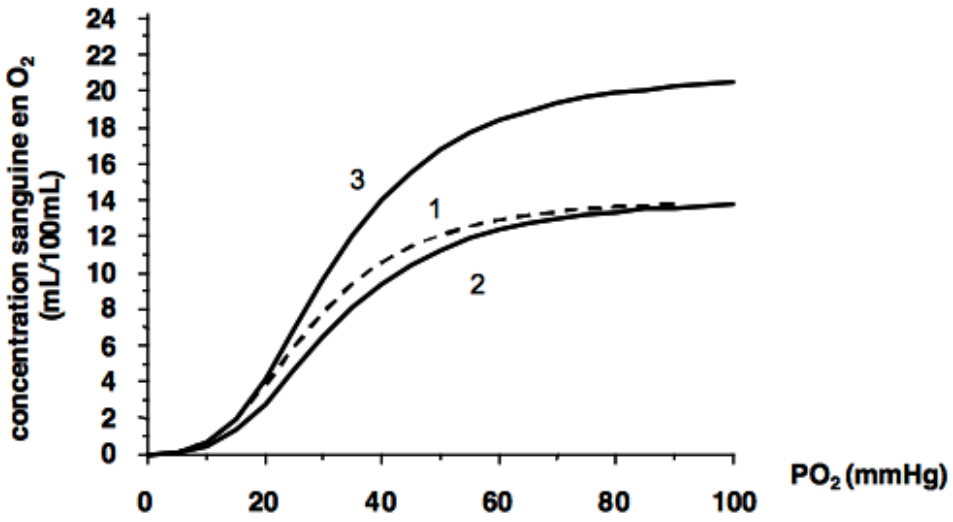


Figure 20 : concentration plasmatique d'EPO et nombre d'érythrocytes lors d'un séjour en altitude (4300 m).

L'hématocrite peut ainsi passer en 3 à 4 semaines de 40/45 % à 55/60 % ; il peut même atteindre 80 % (polyglobulie pathologique d'altitude), chez des sujets acclimatés comme chez des sujets natifs. Cette polyglobulie a plusieurs conséquences. Tout d'abord, l'augmentation du nombre de globules rouges et par conséquent de la concentration en hémoglobine du sang va augmenter la concentration en oxygène dans le sang, pour une PO_2 donnée.



<u>Figure 21</u> : concentration sanguine en O2. 1) au niveau de la mer ; 2) après 2 jours à 4000 m ; 3) après 3 semaines à 4000 m.

La concentration en oxygène du sang est donnée par la formule :

$$(1{,}39 \times Hb \times (Sat/100)) + 0{,}003\ PO_2$$

Ceci va se traduire par une augmentation de la quantité´ d'oxygène disponible au niveau tissulaire permettant ainsi un meilleur transport de l'oxygène et en conséquence la baisse du débit sanguin cardiaque.

D'autre part, cette polyglobulie entraine une augmentation importante de la viscosité du sang conduisant à des troubles de la circulation, en particulier de la circulation cérébrale, voire à des thromboses.

La polyglobulie pathologique d'altitude est une réponse « inappropriée » de l'organisme, la réponse est plus difficile pour la polyglobulie modérée. Il s'agit d'une réponse adaptée, puisqu'elle augmente la concentration en oxygène dans le sang, et augmente par ailleurs les performances sportives. Cependant, la polyglobulie engendrée entant supérieure à celle requise pour une efficacité optimale, elle serait considérée comme une réponse adaptive incorrecte. La polyglobulie d'altitude s'observe chez les sujets acclimatés alors qu'elle

s'observe nettement moins chez les populations des hauts plateaux tibétains, népalais ou himalayens dont le peuplement est plus ancien. La diminution de la réponse polyglobulique excessive à l'altitude est considérée comme un début d'adaptation génétique des populations à l'altitude.

La vasoconstriction hypoxique engendrée par la diminution de la PO_2 alvéolaire conduit à une hypertension artérielle pulmonaire (HTAP) chronique, associée à des remaniements de la structure des artères pulmonaires.

Le remodelage de la paroi artérielle pulmonaire est visible au niveau de : (19)

- L'intima : épaississement des couches endothéliales et sous-endothéliales
- La média : augmentation de la production de collagène et de l'élastine, modification du nombre et de l'architecture des lames élastiques et augmentation de la quantité´ de muscle lisse. L'augmentation de l'épaisseur de la média et de la quantité de muscle lisse peut être quantifiée par des mesures morphométriques.
- L'adventice : prolifération et hypertrophie des fibroblastes adventitiels et augmentation de la production de collagène de type I

Ceci entraine une hypertrophie cardiaque droite due à l'augmentation de la post charge que l'on peut objectiver en mesurant le rapport du ventricule droit (VD) sur le ventricule gauche + septum (VGS).

D'autre part, il semble que la réactivité du muscle lisse ainsi que sa signalisation calcique puissent être modifiées lors d'HTAP. En situation basse altitude, la stimulation de la cellule musculaire lisse de l'artère pulmonaire par divers agonistes contractants, comme l'ATP, l'endothéline 1 ou l'angiotensine II, entraine une réponse oscillante. En revanche, ces oscillations disparaissent dans les cellules d'artère pulmonaire des personnes maintenues pendant au moins 15 jours en hypoxie d'altitude (5500 m). Le pourcentage de cellules répondantes diminue. Ces modifications de la signalisation calcique sont en rapport avec les remaniements musculaires.

L'hypertension artérielle pulmonaire est ainsi associée à un remodelage important de la paroi de l'artère pulmonaire, ainsi qu'à des modifications fonctionnelles du muscle lisse. L'importance de l'HTAP dépend de l'altitude.

L'hypoxie chronique ne modifie pas uniquement la réactivité du muscle lisse vasculaire pulmonaire, mais également celle du muscle lisse des voies aériennes. L'hypoxie entraine une augmentation de la sensibilité des voies aériennes, et, au niveau cellulaire, une modification de l'homéostasie calcique. L'hypoxie d'altitude chronique (2 semaines à 5500 m) entraine une modification de la réactivité des voies aériennes, en particulier une hypersensibilité à la stimulation muscarinique. Cette hypersensibilité est retrouvée au niveau du signal calcique.

Cependant, l'hypersensibilité sur la réponse calcique et, à un moindre degré, sur la réponse contractile, s'accompagne d'une diminution de la contractilité, sans modification de sa morphologie. L'hypoxie chronique semble avoir un effet sur les voies aériennes, diffèrent de celui observé sur les artères pulmonaires, qui se caractérise par une augmentation de la réponse calcique et une hypersensibilité, associée à une diminution de la contractilité maximale ou hypo réactivité, dut à la modification de la sensibilité de l'appareil contractile au calcium.

L'hypoxie stimule par ailleurs la néoformation de capillaires sanguins. Cette prolifération des vaisseaux sanguins résulte de l'activité de facteurs de croissance, parmi lesquels le VEGF, le PDGF, le placenta growth factor et le transforming growth factor B-1. Le VEGF (vascular endothelial growth factor) stimule la mitogénèse des cellules endothéliales et la prolifération capillaire. L'hypoxie entrainerait une augmentation de l'expression du gène du VEGF dans le rein, le cerveau et les muscles squelettiques.

Cette prolifération capillaire permet donc une meilleure oxygénation des tissus. En effet, la distance moyenne entre le sang oxygéné et les tissus est diminuée, ce qui favorise les échanges gazeux par diffusion.

La réponse à l'hypoxie concerne alors la stimulation des chémorécepteurs des glomus carotidiens et aortiques et la mise en jeu de systèmes reflexes, mais également d'un certain nombre de types cellulaires différents : cellules productrices d'EPO dans le rein et dans le foie fœtal, cellules musculaires lisses, cellules endothéliales, etc.

Les cellules sont capables de répondre spécifiquement à l'hypoxie et cela grâce à une protéine héminique. La présence ou l'absence d'oxygène correspond à un changement conformationnel de l'hème et par suite une modification de la fonction de la protéine héminique.

De plus, lors d'un séjour en altitude supérieure à 5000 mètres, on observe une perte de poids de 1 à 2 kg par semaine. Les pertes se font dans un premier temps aux dépens de l'eau corporelle, puis de la masse grasse et pour finir de la masse maigre. Cette perte de poids est due tout d'abord à la diminution et au fractionnement de la prise alimentaire, puis à l'altération légère de l'absorption des sucres et graisses au niveau intestinal et enfin à l'augmentation du métabolisme de base par l'exercice.

L'homme est donc capable de s'adapter à l'environnement de la très haute altitude pendant un moment, mais n'est pas capable d'y vivre en bonne santé à plus long terme.

L'importance de toutes ces modifications varie fortement en fonction des individus, et dépend également de l'altitude à laquelle s'effectue le séjour. Pour l'homme, la vie permanente au-delà de 5000m n'est pas possible, l'état de santé, après une phase d'acclimatation et d'acclimatement, se dégradant de manière irrémédiable si le séjour en altitude se prolonge.

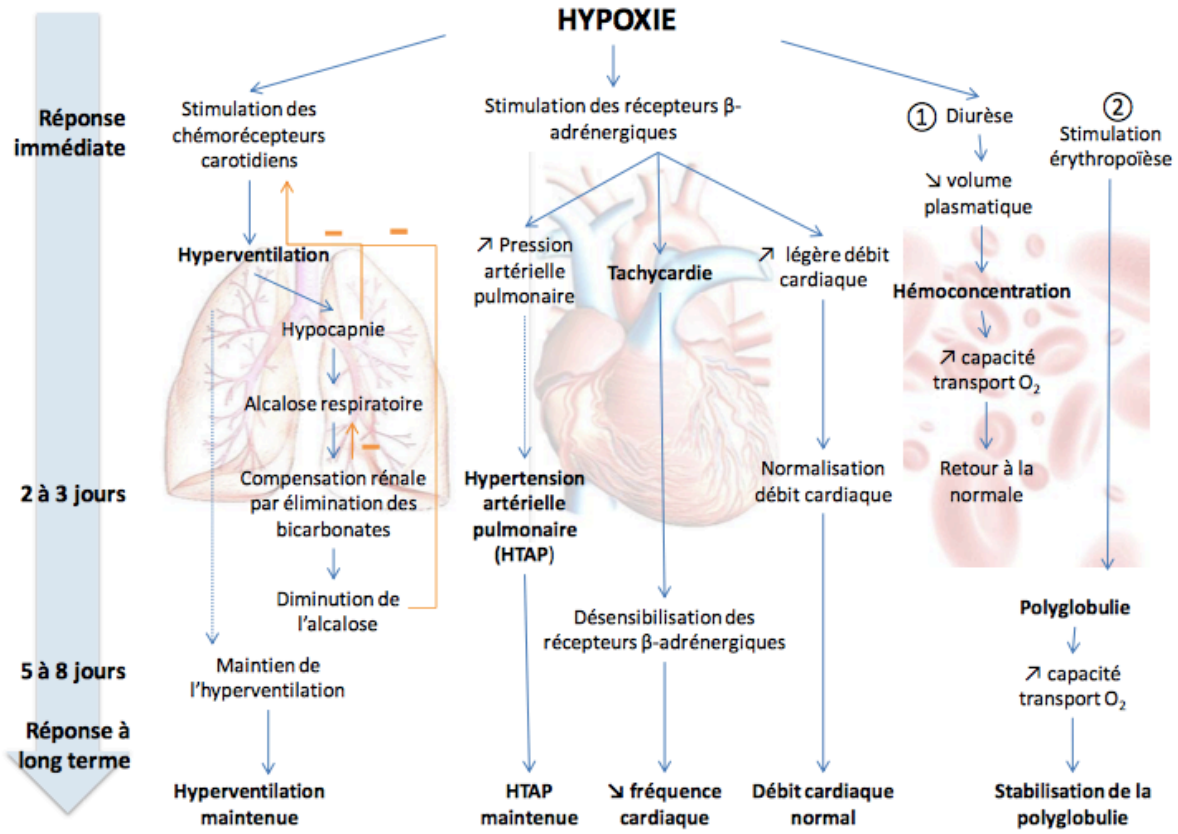


Figure 22 : récapitulatif des principales adaptations de l'organisme face à l'hypoxie d'altitude. Source : Richalet J-P. Modification physiologique et pathologiques en haute altitude, 2008.

4.5. Les populations vivant en altitude

Les modifications physiologiques, et éventuellement morphologiques comme la prolifération capillaire induite par un séjour prolongé de quelques semaines en altitude persistent autant que dure la vie en altitude, et se retrouvent globalement chez les populations qui sont nées dans ces conditions d'hypoxie ; toutefois, des différences existent entre les personnes acclimatés à l'altitude (c'est-à-dire qui sont nés dans des conditions normoxiques avant de vivre en altitude) et les personnes natives.

Durant la première décennie du XXIème siècle, les chercheurs ont bénéficié d'une amélioration considérable des techniques de séquençage de génomes entiers et de celles permettant l'exploitation des séquences obtenues. Grâce à cela, de nombreux chercheurs commence à publier des résultats sur la génétique de l'adaptation à l'altitude des Tibétains (20) comparé à la population des Hans des plaines ou encore des Andes. Des études menées sur les populations himalayennes (21) ont montré que les particularités observées chez les habitants de d'Amérique du Sud ne se retrouvaient pas de la même manière. Des études récentes effectuées auprès des populations vivant sur les hauts plateaux d'Éthiopie aurait révélé que ces dernières possédaient des

caractéristiques physiologiques différentes à la fois de celle des populations d'Amérique du Sud et de celle de l'Himalaya. Il apparait donc que les caractéristiques de fonctionnement de l'appareil respiratoire est spécifique à chaque population. Les différentes stratégies d'adaptation à la vie en haute montagne est probablement liée à la durée que les différents peuples ont passée à très haute altitude, très longue pour les Tibétains (entre 15 000 et 40 000 ans environ) et plus courte pour les Andins et les Éthiopiens (entre 5 000 et 10 000 ans).

Concernant les populations himalayennes, elles ont acquis des adaptations héréditaires à l'altitude extrême pour maintenir une oxygénation tissulaire en altitude sans augmentation de l'érythrocy@tose. Plusieurs séquences montrant des fréquences de modification allélique spécifiques de cette population ont été identifiées et considérées comme de bons gènes candidats pour l'adaptation à l'altitude.
Le signal le plus fort de la sélection naturelle est celui de EPAS1 (ou *HIF2a*), un facteur de transcription impliqué dans la réponse à l'hypoxie. Un polymorphisme nucléotidique au niveau de EPAS1 montre une différence de fréquence de 78% entre les tibétaines des hauts plateaux et les Hans des plaines fluviales. Il s'agit de la plus forte variation de fréquence allélique observée sur tout le génome humain. L'association de ce polymorphisme nucléotidique avec l'abondance érythrocytaire confirme le rôle de EPAS1 dans l'adaptation à l'hypoxie. (22)

Les conséquences physiologiques de l'adaptation héréditaire des populations himalayens vivant en hautes altitudes influencent donc différents paramètres : la ventilation, la P02 et PC02, la réponse à l'02, CO2 et au pH, la quantité d'hématocrites et hémoglobines, la diffusion alvéolo-capillaire et le volume pulmonaire.

En Amérique du Sud, les sujets nés en altitude présentent un débit ventilatoire moindre que les sujets des plaines déjà acclimatés à l'altitude. L'hyperventilation est donc moins marquée chez les sujets natifs et résidents permanents que chez les sujets acclimatés. Ces caractéristiques ne se retrouvent pas chez les Tibétains, qui ont un débit respiratoire plus élevé que les populations des Andes. En ce qui concerne les pressions partielles en oxygène et en gaz carbonique sont grosso modo les mêmes chez les sujets natifs et les sujets acclimatés. La pression alvéolaire en O_2 et en CO_2 diminue corrélativement à l'altitude de vie. En Amérique du Sud, les populations natives présentent, par rapport aux personnes acclimatées, une moins grande sensibilité aux variations d'oxygène, de gaz carbonique et de pH, qui malgré tout demeure. Par exemple, l'inhalation d'oxygène pur entraine une diminution du débit ventilatoire de 10 % chez les sujets vivant au niveau de la mer. À 3500 m, cette diminution est de 30 % chez les nouveaux arrivants, alors qu'elle n'est que de 15 % chez les personnes natives. Chez certains sujets, la sensibilité à l'oxygène disparait totalement. Cette disparition est associée à la polyglobulie pathologique d'altitude.

Encore une fois, il convient de noter que ces particularités ne se retrouvent pas chez populations tibétaines, qui ont un fort reflexe d'accélération du débit respiratoire quand la pression partielle en oxygène diminue. Ils ne présentent par ailleurs pas de phénomène de polyglobulie.

L'hématocrite des populations natives des hauts plateaux andins est élevé. Alors que l'hématocrite normal d'une population vivant au niveau de la mer est de 40 à 45 %, celui des habitants de La Paz est considéré comme normal jusqu'à 57 %. De plus, il existe fréquemment, y compris chez les populations natives, une polyglobulie pathologique, au cours de laquelle l'hématocrite peut facilement atteindre 80 %. Une fois de plus, il convient de noter que cette polyglobulie ne s'observe que dans les populations natives d'altitude en Amérique du Sud, et ne se retrouve ni dans les populations tibétaines ni dans celle des hauts plateaux Ethiopiens. Les études effectuées dans ces populations ont montré que l'hématocrite comme la concentration d'EPO entaient identiques aux populations de plaine. Les populations tibétaines ne présentent pas non plus d'augmentation de la concentration sanguine en hémoglobine. Dans les populations andines et tibétaines, on observe une diminution du pourcentage de saturation de l'hémoglobine comparée aux populations de plaine. Ceci s'explique par la diminution de la pression partielle en oxygène inspiré qui est de l'ordre de 60 mmHg.

A propos de la diffusion alvéolo-capillaire, elle est nettement supérieure chez les sujets natifs d'altitude par rapport aux sujets acclimatés. Cette augmentation de la diffusion alvéolo-capillaire peut s'expliquer par une augmentation de la surface d'échange, liée à une surface alvéolaire et un lit capillaire augmenté, associé à un plus grand volume pulmonaire global. La capacité vitale est augmentée de 10 à 18 % chez les natifs d'altitude par rapport aux résidents du niveau de la mer. Cette augmentation du volume pulmonaire observé chez l'homme semble conditionnée par les facteurs liés au développement.

Il y a donc plusieurs niveaux de modifications des réponses fonctionnelles : les réponses à court terme, les réponses à moyens terme et les réponses des natifs.

4.6. Prévention des pathologies aiguës de haute altitude.

4.6.1. Technique d'acclimatation.

Pour une bonne acclimatation lors d'une ascension en haute altitude, il existe 4 règles importantes à suivre : (15)

1) Ne pas monter trop vite, trop haut
2) Monter haut mais dormir bas
3) Ne pas faire d'effort trop intense en début de séjour
4) Ne pas rester trop haut trop longtemps

Ne pas monter trop vite trop haut : Cette règle est particulièrement effective en début de séjour, alors que l'acclimatation ne s'est pas encore mise en place. La vitesse d'ascension entre deux nuits consécutives ne doit

pas dépasser 300 à 500 mètres au-delà de 3500 mètres dans la phase d'acclimatation en début de séjour et rester une journée à altitude constante tous les 3 ou 4 jours. (23)

Exemple 1 : 1ère nuit à 3500m, 2ème nuit à 4000m, 3ème nuit à 4300m

Exemple 2 : 1ère nuit à 3500m, 2ème nuit à 4300m, 3ème nuit repos à 4300m Dans les deux cas, la différence d'altitude moyenne entre deux nuits est de 400 mètres.

Éviter les efforts intenses en début de séjour : Le taux d'oxygène dans le sang diminue lorsque l'on fait un effort, même minime, en altitude. Ainsi, par exemple au sommet du Mont-Blanc (4810 mètres) ce taux est de 88% au repos et de 78% à l'effort, ce qui correspondrait au taux mesuré au repos à 7000 mètres d'altitude. Ainsi, le fait d'arriver en courant au sommet du Mont Blanc ferait monter de 2200 mètres plus haut ! Faire une pause de 5 minutes toutes les 30 minutes de marche permettent non seulement de récupérer, de se réhydrater mais également de se ré-oxygéner naturellement. La montée en "dents de scie" peut être favorable à l'acclimatation, à condition qu'elle ne s'accompagne pas d'un effort excessif : dans l'exemple 1, entre la 1 ère et la 2ème nuit, on pourra passer un col à 4500 mètres, puis redescendre dormir à 4000 mètres. Par contre, monter le col en courant ou escalader une "petite butte" de 5000 mètres à coté, n'ajoutera rien et fatiguera inutilement. A chacun d'adapter son effort à ce qu'il ressent de son degré d'acclimatation : absence de maux de tête, bon appétit, bon sommeil sont les meilleurs signes d'une bonne acclimatation.

Monter suffisamment haut pour s'acclimater : Cette règle concerne essentiellement le choix (pas toujours possible) de l'altitude du camp de base dans une expédition. Selon l'objectif visé, il sera nécessaire d'établir un "camp d'acclimatation" : pour un sommet supérieur à 7000 mètres, l'altitude idéale pour ce camp se situe entre 4800 et 5200 mètres. L'organisme a besoin d'avoir été confronté à une altitude suffisante pour stimuler correctement ses 2 mécanismes de défense contre le manque d'O2. Ainsi, un séjour d'acclimatation prolongé à 4300 mètres pour tenter un sommet de 8000 mètres, ne sera pas favorable à une bonne performance.

Ne pas rester trop haut trop longtemps : L'homme n'est pas fait pour vivre au-delà de 5500 mètres. D'ailleurs, aucune population ne vit en permanence à ces altitudes. En effet, l'organisme s'y dégrade de façon irrémédiable (perte de poids, perte de muscle…) d'autant plus vite que le temps resté, des nuits, des efforts intenses produits en haut est long. La prise d'aliments et surtout de boissons y est insuffisante.

Au total, un séjour en altitude se décompose en quatre phases successives dont la durée relative dépend essentiellement de l'altitude : (23)

- Phase "blanche" : pas de signes anormaux avant 4 à 8 heures après un gain en altitude.
- Phase d'acclimatation : quelques jours pendant lesquels on pourra souffrir du MAM et où se développeront les mécanismes d'acclimatation. S'abstenir d'y faire des efforts très intenses.

- Phase d'acclimatement : c'est la phase optimale où l'organisme est acclimaté et encore performant : 1 à 4 semaines.
- Phase de dégradation : l'organisme perd progressivement son efficacité, "s'épuise" pour des efforts de plus en plus faibles.

L'importance relative de ces phases dépend de l'altitude considérée. A partir d'environ 5500 mètres, il existe toujours une phase de dégradation. Au-delà de 7000 mètres, la phase d'acclimatement est très courte.

Une période de pré-acclimatation (naturelle ou artificielle) peut être bénéfique, à condition qu'il ne se passe que 2 à 3 jours entre la pré-acclimatation et l'ascension en altitude.

La pré-acclimatation naturelle consiste à faire quelques ascensions préalables d'une journée à 3000 mètres, à répéter plusieurs fois quelques semaines avant l'expédition.

La pré-acclimatation artificielle consiste à s'exposer à une hypoxie simulée au niveau de la mer. Elle peut donner un faux sentiment de sécurité, et les sujets pourraient avoir tendance à faire une ascension plus rapide que s'il n'y avait pas eu d'acclimatation. Ils s'exposent donc plus fortement au MAM et à ses complications.

Pour les individus arrivant à une haute altitude (vers 3500 mètres) en avion ou téléphérique, il est conseillé de rester à l'altitude d'arrivée 2 à 3 jours avant de débuter l'effort physique.

4.6.2. Score du MAM

Les signes cliniques du MAM (24) sont observés chez environ 50% des sujets se rendant à des altitudes supérieures à 3000 mètres et y séjournant plus de 6 heures.

Cette « mal adaptation » peut également se traduire par des œdèmes localises : yeux, face, chevilles. Certains sujets notent eux-mêmes une diminution du volume urinaire.

Un score d'autoévaluation (score de Hackett), le plus couramment utilisé peut-être établi à partir des signes observés :

↳ céphalées ↳ nausées ou perte d'appétit ↳ insomnies ↳ vertiges	1 point
↳ céphalées ne cédant pas à l'aspirine/paracétamol … ↳ vomissements	2 points
↳ essoufflement au repos ↳ fatigue anormale ou importante ↳ baisse de la diurèse	3 points

Score

de 1 à 3 points	MAM léger
de 4 à 6 points	MAM modéré
> à 6 ponts	MAM sévère

Tableau 6 : score du MAM.

4.7. Traitements des pathologies aiguës de haute altitude

Un mal aigu des montagnes bénins peut souvent être guérit par un arrêt de l'ascension et une attente d'un à trois jours pour s'acclimater.

La redescente ne pourra jamais être préjudiciable pour l'individu mais est obligatoire en cas de MAM sévère, d'OCHA et d'OPHA. La redescente doit se faire accompagné, et ce, jusqu'à résolution totale des symptômes. Souvent, 300 à 1000 mètres de descente permettent la disparition complète des symptômes. Les mécanismes d'action de la guérison par la redescente résident dans le fait qu'en redescendant, la pression partielle en oxygène augmente, permettant l'oxygénation de tous les organes. La redescente va parfois être impossible à cause de la météo, l'impossibilité de se déplacer, la nuit ou la position géographique (col à remonter pour descendre, plateau...). Dans ces cas-là, d'autres méthodes devront être utilisées. (25)

Un supplément en oxygène peut se révéler remarquablement efficace pour soulager le patient de ses symptômes, et ceci particulièrement durant la nuit. En effet, pendant le sommeil la saturation en oxygène du sang est susceptible de diminuer, augmentant par la même occasion la sévérité des symptômes. Il existe d'ailleurs des descriptions de personnes retrouvées mortes au matin et qui semblaient n'expérimenter aucun symptôme le jour précèdent. L'oxygénation ne doit en aucun cas retarder ou dispenser de la redescente en cas de pathologies aigues. L'administration de 2 à 15 litres/minute d'oxygène va être nécessaire pour garder une $SaO_2 > 90\%$, et ce jusqu'à disparation ou au moins diminution des symptômes.

Lors de la période d'acclimatation à l'altitude, l'exercice soutenu devrait être évité. L'exercice léger peut néanmoins se révéler bénéfique car il augmente la saturation en oxygène du sang.

La descente simulée par l'utilisation de chambres hyperbares portables s'est montrée efficace pour le traitement symptomatique des patients, mais ces chambres stoppent bien évidemment le processus d'acclimatation et n'autorisent pas le patient à demeurer en altitude une fois sorti.

Un caisson portable gonflable qui génère une surpression, afin de contrer la dépressurisation qui cause les symptômes du mal aigu des montagnes peut aussi être utilisé. Tout comme pour l'oxygénothérapie, la mise en œuvre ne doit jamais retarder la redescente. Il sera efficace pour permettre de passer un cap aux patients. Il est associé le plus souvent à des mesures pharmacologiques. Le caisson génère une surpression maximale de 105 mm Hg (modèle Gamow Bag) à 156 mm Hg (modèle CERTEC) : la descente simulée est d'autant plus efficace que la surpression est importante et la séance à altitude élevée. C'est un sac étanche dans lequel est placé le malade. Il est composé d'une housse en cordura doublée d'une vessie en polyuréthane avec un hublot, un manomètre, une fermeture étanche, deux soupapes étanches et deux robinets. Il existe actuellement deux modèles de caisson : le caisson Gamow Bag (Américain) et le caisson Certec (Français). Le caisson Certec pesé 4,8 kg, et le caisson Gamow Bag pesé 6,5 kg : ils sont donc facilement transportables. Le malade est placé allongé dans le caisson, la fermeture éclair est fermée et les sangles attachées. La pompe permet d'atteindre 220 mbar, soit une perte simulée de 3000 mètres. 8 à 12 coups de pompe par minute sont nécessaires pour maintenir le taux d'oxygène convenable dans le caisson, ainsi que pour faire diminuer la pression. La personne doit rester 1 à 2 heures à l'intérieur pour que le traitement soit efficace. L'utilisation du caisson hyperbare peut entrainer des effets indésirables tels que : hypocapnie, angoisse, claustrophobie, nausée, rupture du tympan, pneumothorax barotraumatique (causé par une ouverture brutale).



Figure 23 : caisson hyperbare CERTEC. Source : http://www.boutique-certec.fr/Trekking.

Ces chambres peuvent être un excellent outil en cas de MAM sévère, d'œdème du poumon ou d'œdème cérébral, car elles permettent une dépressurisation du patient bien plus rapide qu'un transport vers un site plus

bas situé. Cependant, l'utilisation du caisson hyperbare est contre-indiquée à des altitudes supérieures à 7000 mètres car son aménagement demande beaucoup d'énergie pour les personnes s'occupant du malade.

4.7.1. Traitements médicamenteux

4.7.1.a) Mal aigu des montagnes légers et modéré

En ce qui concerne les céphalées : (26)

- Le Paracétamol : (25) analgésique périphérique, connu aussi sous ses noms de spécialités Doliprane®, Dafalgan®, Efferalgan®, Claradol®, Geluprane®…Il est indiqué en cas de céphalées, douleurs, état fébrile. Sa posologie est pour un adulte de 4g/24h en 4 prises espacées de 6heurs et pour les enfants de 60mg/Kg/24h en 4 prises espacées de 6h. Ses contre-indications sont l'insuffisance hépatique et l'hypersensibilité connu au paracétamol. Ses effets indésirables sont des réactions cutanées allergiques, érythème pigmenté, thrombopénies allergiques (rare), hépato toxicité à doses sur-thérapeutique, et l'injection en IM douloureuse il est préférable d'utiliser la voie IV.
- L'Aspirine : Analgésique périphérique, connu aussi sous ses noms de spécialités Aspegic®, Aspirine upsa®… Ses indications sont les céphalées, douleurs, état fébrile. Sa posologie est pour les adultes de 500 mg à 1g 3 fois par jour et pour les enfants de 25 à 50 mh/kg/24h en 3 à 4 prises. Ses contre-indications sont l'allergie à l'aspirine et aux salicylés, des maladies ulcéreuse ou gastroduodénales, des maladies hémorragiques avec allongement du temps de saignement persistant de 4 à 8 jours après l'arrêt, le syndrome de Reye (rare) : encéphalopathie et atteinte hépatique aigue chez l'enfant et le jeune adulte atteint de virose.
- L'Ibuprofène : Anti-inflammatoire non stéroïdien, connu aussi sous ses noms de spécialités Advil®, Antarene® Nureflex®, Nurofen®, Spifen®, Spedifen®, Upfen®… Ses indications sont les céphalées, douleurs, états fébriles. Sa posologie pour l'adulte est de 200 à 400 mg par prise pendant les repas à renouveler 6 à 8heures plus tard et pour les enfants de 20 à 30 mmg/kg/24h en 4 prises espacées de 6 à 8 heures. Ses contre-indications sont une insuffisance hépatique et rénale, ulcère gastroduodénal en évolution, grossesse et allaitement et allergies aux AINS. Ses effets indésirables sont digestifs (nausée, vomissements, dyspepsie, diarrhée…), allergies (prurit, oedeme de Quincke…) et neurologique (vertiges, céphalées, troubles visuels bénins, somnolence, acouphène, asthénie, insomnie). Ses interactions médicamenteuses déconseillées sont l'associations d'AINS, anticoagulants, le lithium et le méthotrexate.

En ce qui concerne les nausées et vomissements :

- Dompéridone :(25)(26) antiémétique antagoniste de la dopamine, connu aussi sous ses noms de spécialités Motillum®, Motilyo®, Peridys®, Biperidys®. Ses indications sont les nausées, vomissements, trouble dyspeptique. Sa posologie est pour l'adulte 10 à 20 mg, 3 fois par jour une demie heure avant les repas et

pour les enfants 0,75 mg/kg/24h en 3 prises par jour. Ses contre-indications sont l'hémorragie, obstruction ou perforation intestinale, hypersensibilité aux produits ou aux excipients. Ses effets indésirables sont la gynécomastie, aménorrhée, les troubles du rythme ventriculaire et de mort subite surtout après 60 ans et supérieur à 30 mg/24h. Les interactions médicamenteuses déconseillées sont avec les anticholinergiques.

- Metopimazine : antiémétique antagoniste de la dopamine, connu aussi sous ses noms de spécialités Vogalène®, Vogalib®. Ses indications sont les nausées, vomissements. Sa posologie pour l'adulte est 7,5 à 15 mg par jours et pour les enfants de 1mg/kg/24h en 2 à 3 prises. Ses contre-indications sont le risque de glaucome à angle fermé, risque de rétentions urinaire et hypersensibilité aux produits ou aux excipients. Ses effets indésirables sont ceux des neuroleptiques à forte dose ou en traitement prolongé : somnolence, dyskinésie, gynécomastie, aménorrhée, allongement QT, arythmie ventriculaire et réaction cutanée allergiques (rare). Les interactions médicamenteuses déconseillées sont avec les neuroleptiques, la levodopa et agonistes dopaminergiques.

Pour les troubles du sommeil : (27)

- Zolpidem : hypnotique (imidazopyridine), aussi connu sous son nom de spécialité le Stilnox®. Ses indications sont les insomnies à une posologie pour un adulte de 5 à 10mg au coucher. Ses contre-indications sont l'insuffisance respiratoire ou hépatique sévère, l'apnée du sommeil, l'utilisation chez les enfants, la myasthénie, l'hypersensibilité ou zolpidem. Ses effets indésirables sont les sensations de vertiges, somnolence diurne, céphalées, nausées et vomissement, asthénie, la dépendance à l'arrêt est brutale : anxiété, insomnie, tremblement, crampe, nausée… Une précaution d'emploi est nécessaire car il altère la vigilance, il faut éviter les activités qui nécessitent une grande concentration. Les interactions déconseillées sont l'alcool et les autres antidépresseurs du système nerveux central.

Le Zolpidem dans le mal aigu des montagnes : Une étude sur l'utilisation du Zolpidem lors d'insomnies dans les pathologies de haute altitude a démontré qu'il avait une action positive sur le sommeil (sommeil efficace augmenté) sans avoir d'effet délétère sur la respiration, l'attention ou l'humeur. L'utilisation peut donc se faire sans risque et la 1⁄2 vie courte (2,4 heures) permet de ne pas avoir d'effet résiduel d'hypnotique au petit matin. Cependant, l'utilisation d'hypnotiques en haute altitude devrait être réservée aux personnes souffrant de troubles du sommeil sévères.

4.7.1.b) Mal Aigu des Montagne sévère et Œdème Cérébral de Haute Altitude

Les traitements décrits pour le MAM légé peuvent aussi être utilisés pour ces pathologies. (28)(25)(26)

- Acetazolamine : inhibiteur de l'anhydrase carbonique, aussi connu sous ses noms de spécialités le Diamox® VO ou IV. Ses indications sont la prévention du MAM et de l'OCHA en cas de montée rapide en avion, gain rapide entre deux nuits (1000mètres), antécédent de MAM, le traitement du MAM et de l'OCHA, l'hypercapnie, œdèmes cérébraux post-traumatiques (IV) et le glaucome chronique non contrôlé par collyre anti-glaucomateux. Ses posologies en traitement pour l'adulte sont de 250 mg PO/IV/IM à renouveler 8h plus tard et pour l'enfant de 2,5 mg/kg à renouveler toutes les 12h. En prévention pour l'adulte sa posologie est de 125 à 250 mg/24h PO à commencer 2 jours avant l'ascension et chez l'enfant de 5 à 10 mg/kg/24h. Ses contre-indications sont l'allergie aux sulfamides, insuffisance rénale, insuffisance hépatique, hyperphosphorémie, grossesse, acidose métabolique, ATCD colite néphrétique. Ses effets indésirables sont l'hypokaliémie avec acidose métabolique, lithiase urinaire, asthénie, somnolence, troubles digestifs… réactions d'intolérance aux sulfamides : paresthésie lèvres et mains, éruption cutanées, troubles hématologiques (thrombopénie, agranulocytose, aplasie), et modifications du gout des boissons gazeuses. Ses précautions d'emplois sont la surveillance kaliémie et l'apport de potassium si besoin (kaleorid®) car fuite de potassium due au mécanisme d'action et majorer les apports hydriques car action diurétique. Les interactions déconseillées sont avec le lithium, médicaments torsadogènes (amiodarone, anti-arithmétiques, sotalol, vincamine, érythromycine). Les associations à surveiller sont avec les biguanides et antidiabétiques, les AINS, digitaliques médicaments hypokaliéliants et les tétracyclines. Ses mécanismes d'actions (29) sont l'inhibition de l'anhydrase carbonique qui entraine une inhibition de la formation de bicarbonate et donc une acidose. Cette acidose permet l'augmentation de la sensibilité aux chémorécepteurs, ce qui favorise l'hyperventilation et diminue la vasoconstriction hypoxique (en augmentant le débit sanguin) et l'action diurétique (mécanisme d'action secondaire) qui permet une diminution de liquide, soit une diminution de l'œdème et donc de la pression intracrânienne. Cela permet une amélioration de l'état de MAM et d'OCHA.
- La Dexamethasone : corticoïde de synthèse connue sous ses noms de spécialités la Dexamethasone® IV/IM, Dectancyl® VO, Neodex® VO. Ses indications ici sont le traitement du MAM et de l'OCHA. Ses posologies en cas de traitement sont pour les adultes de 8mg VO/IV/IM puis 4mg toutes les 6heures et pour les enfants de 0,15 mg/kg toutes les 6heures. En cas de prévention pour l'adulte 2mg toutes les 6heures ou 4mg toutes les 12h, à commencer deux jours avant le départ et à arrêter 2 jours après avoir atteint l'altitude maximale. Il n'y a pas de contre-indications absolue dans le cas de MAM ou OCHA car le rapport bénéfices/risque est très important. Ses effets indésirables son ceux des corticoïdes en général, changement d'humeur, hyperglycémie, hyperkaliémie, troubles digestifs… et effet rebond possible à l'arrêt. Ses mécanismes d'actions sont (25) (31) l'effet anti-inflammatoire et anti-œdémateux : diminution du volume sanguin cérébral et le changement de perméabilité capillaire et relâchement de cytokine. L'effet

observé est l'amélioration nette en 2heures et jusqu'à 12heures suivant l'administration. La co-administration avec l'acétazolamide a prouvé un gain d'efficacité par rapport aux deux traitements administrés séparément.

4.7.1.b) Œdème Pulmonaire de Haute Altitude.

Les traitements décrits pour le MAM léger, modéré et l'OCHA peuvent aussi être utilisés pour ces pathologies. (30)

- La Nifédipine : inhibiteur calcique connu aussi sous ses noms de spécialités Adalate®, Adalate LP®, Chronadalate LP®. Ses indications sont la prévention de l'OPHA et son traitement. Ses posologies pour le traitement d'un adulte est de 10mg sublingual à répéter 15minutes après s'il n'y a pas d'amélioration en ajoutant 20mg LP toutes les 6 heures. En prévention sa posologie pour un adulte est de 10 mg VO toutes les 4 heures à commencer le jour du départ, jusqu'à 2 jours apres avoir atteint l'altitude maximale. Ses contre-indications sont l'angor instable ou IDM datant de moins de 1 an, grossesse et allaitement et l'hypersensibilité à la Nifédipine. Ses effets indésirables sont l'hypotension et la tachycardie réflexe. Son mécanisme d'action est la création d'une vasoconstriction pulmonaire qui entraine une diminution de l'hypertension artérielle pulmonaire. On observe alors une amélioration de la Sa02 et donc une amélioration des symptômes de l'OPHA.
- Le Sildénafil et le Tadalafil : inhibiteur de la phosphodiestérase 5 (IPD5), connus aussi sous leurs noms de spécialités Revatio®, Viagra®, Adcirca® et Cialis®. Leurs indications ici sont la prévention et traitement de l'OPHA pour les personnes qui ne tolèrent pas la Nifédipine et le traitement de l'HTAP. Leurs posologies sont pour le traitement chez l'adulte de 20mg toutes les 6 à 8heures pour le sildénafil et 10 mg toutes les 12heures pour le Tadalafil. Pour la prévention la posologie est de 10mg toutes les 12heures pour le Tadalafil. Leurs contre-indications sont des antécédents récent d'AVC, IDM, troubles du rythme, l'hypotension (TA inférieur à 90/50 mm Hg), l'insuffisance hépatique sévère (pour le sildénafil) et l'hypersensibilité au produit. Les effets indésirables sont des céphalées et l'hypotension. Des interactions médicamenteuses peuvent se faire avec des dérivés nitrés sous toutes les formes, alpha-1 bloquant et les inhibiteurs du cytochrome CYP 3A4. Leurs mécanismes d'actions (31)(32) consistent à diminuer l'HTAP en augmentant l'oxygénation cérébrale et en créant une vasodilatation qui favoriserait les échanges gazeux. L'HTAP étant certainement responsable de l'OPHA, les symptômes vont diminuer lors de l'administration de Sildénafil ou Tadalafil. L'avantage de ces molécules réside dans le fait qu'elles n'ont pas d'effet sur la pression artérielle systémique.
- Le Salmétérol : (32) béta-2 stimulant d'action prolongée, connus aussi sous ses noms de spécialités Serevent diskus®, Serevent®. Ses indications ici sont la prévention de l'OPHA et son traitement. Ses

posologies pour un adultes sont de 25μg inhalés 2 fois par jour à commencer 2 jours avant le départ, jusqu'à 2 jours après avoir atteint l'altitude maximale. Ses contre-indications sont l'hypersensibilité à l'un des composants. Ses effets indésirables sont l'insomnies, anxiété et les tremblements. Ses mécanismes d'actions (32) sont : l'activation du transport Trans épithéliale alvéolaire de sodium, augmentant la clairance de fluide alvéolaire ou donc diminuant la PAP et le blocage des récepteurs béta de l'arbre bronchique donc entrainant une relaxation des muscles lisses et une dilatation des voies respiratoire.

Les IPD5, ainsi que les β-agonistes (salmétérol) ont un niveau de recommandation beaucoup plus faible que la dexaméthasone. Ils sont de grade 2C, soit de faible recommandation, de faible niveau de preuve et la balance bénéfices/risques est faible.

4.7.2. Stratégie de mise en place

Le Mal Aigue des Montagnes au stade léger peut être pris en charge de manière symptomatique avec un arrêt de l'ascension pendant 24h. Si la prise de médicaments résout les symptômes l'ascension pourra se continuer.

Si la prise médicamenteuse n'améliore pas l'état au bout de 6 à 12h, un jour de repos sera nécessaire à la même altitude en prenant soin de bien s'hydrater, dormir la tête surélevée en cas de vomissement et prise de zolpidem si insomnie. De plus, la prise d'acétazolamine à une posologie de prévention peut être envisagée à ce stade pour éviter l'évolution vers un MAM sévère. S'il y a une amélioration, la reprise de l'ascension est envisageable plus doucement, sinon redescente.

En cas de MAM sévère, c'est la descente immédiate de minimum 500m. Si cela est impossible, d'autres techniques sont à dispositions : séance de recompression hyperbare, oxygénothérapie, corticoïdes VO, ou acétazolamine à une posologie de traitement. La remontée est possible après disparition totale des symptômes, si une récidive est notable (fréquent) la redescente est définitive.

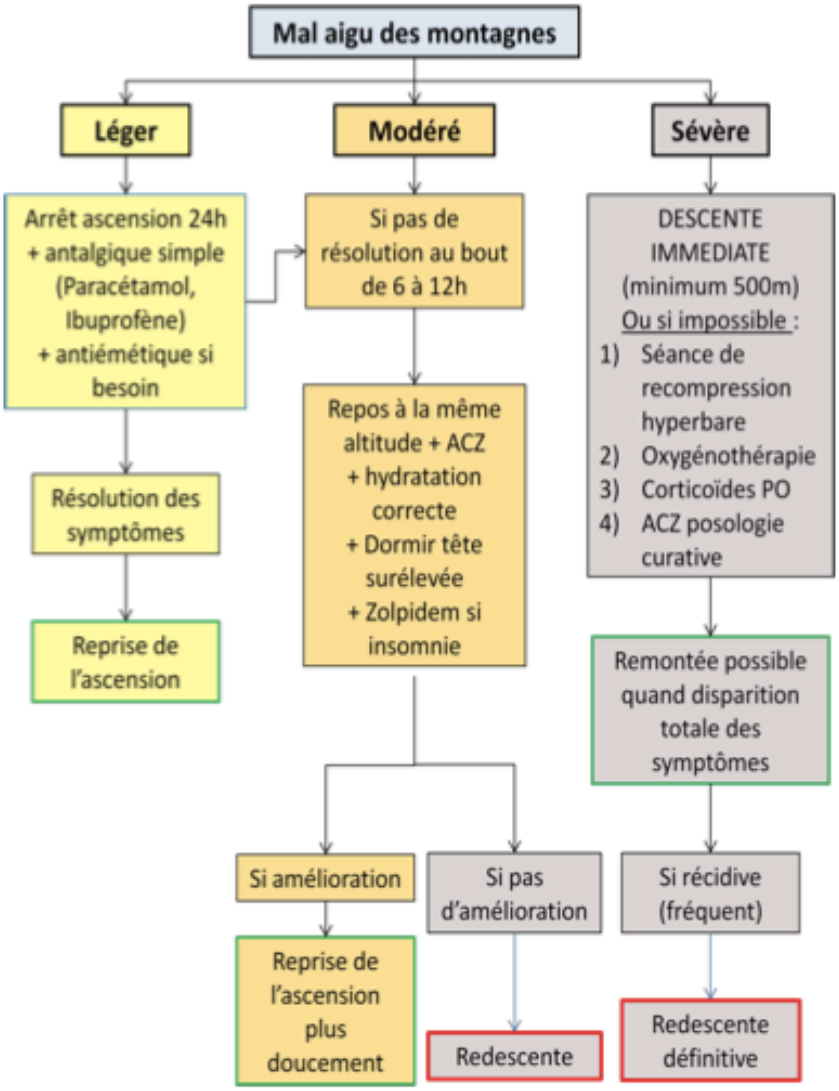


Figure 24 : schéma décisionnel pour la prise en charge du mal aigu des montagnes. Source : Richalet J-P. Herry J-P, Blein J-P, Médecine de l'alpinisme et des sports de montagne, Masson, 2006.

L'œdème cérébral de haute altitude doit impérativement être pris en charge immédiatement, et la redescente doit être la priorité. Aucune autre thérapie ne doit être envisagée en premier si la redescente est possible.

Dans le cas où celle-ci est impossible, l'utilisation d'autres techniques est nécessaire : l'utilisation du caisson de recompression hyperbare, l'oxygénothérapie, l'utilisation de corticoïdes le plus tôt possible. La voie injectable est préférée à cause d'éventuels vomissements et l'acétazolamide peut être considérée à dose curative en complément des corticoïdes.

Après la guérison, aucune ascension ne doit être envisagée avant plusieurs semaines.

Comme pour l'OCHA, l'OPHA nécessite une descente immédiate. Une nette amélioration sera observée après une descente de 500 à 1000 mètres.

Si celle-ci est impossible immédiatement, plusieurs stratégies peuvent se mettre en place : oxygénothérapie, caisson de recompression hyperbare, corticoïdes, administration de nifédipine ou de sildenafil/tadalafil.

Il est important de garder le patient calme et au chaud car le froid et le stress augmentent la pression artérielle pulmonaire.

5. Les facteurs de performances de préparation et durant la course

L'ultra-trail concerne les compétitions à distances proches ou supérieures à 80 km, et se déroule en pleine nature contrairement à la discipline « équivalente » qui se court sur route et en pleine ville (en général), le marathon. Il demande d'autres capacités en plus de celles pour la course à pied sur route ; une certaine technique selon l'environnement, si cela se déroule en forêt et/ou en montagne. Par exemple, lors des montées et des descentes, les pierres, la terre, les racines ou les feuilles peuvent être glissantes et donc il faut adopter certaines techniques pour être plus performant et éviter les blessures dans ces milieux-là.

5.1. Programme d'entrainement

L'entrainement quel que soit les intensités de l'effort, coureur amateur ou élite, il est primordial. L'entrainement est un ensemble d'exercices adaptés, à intensité progressivement croissante, qui aboutissent par des modifications biologiques, physiques et techniques à la réalisation de la plus haute performance possible. (11)

Certains coureurs gèrent ça de par leurs sensations tandis que la majorité préfère se baser sur de la théorie et détermine leurs zones d'entrainement grâce à leur VMA et/ou leur fréquence cardiaque maximale. Il existe différentes zones et elles sont progressivement nommées régénération, endurance extensive, endurance intensive, seuil et VMA.

A tout bon plan d'entrainement s'ajoute un objectif. Un programme d'entrainement, c'est tenir compte des facteurs de la performance de la discipline pratiquée, et de la capacité de l'individu à s'aguerrir sans surcharger les séances dans le but d'éviter les blessures. En fonction de cela, il faut donc prévoir des séances d'entrainements à fréquence par semaine et temps variable afin de progresser à la fin du programme et atteindre ou se rapprocher de ses objectifs. Un programme d'entrainement comprends généralement trois phases :

- Le travail de développement général (1/3 du plan environ)
- Le travail spécifique
- Le relâchement

IL n'y a pas d'entrainement permettant d'améliorer toutes les qualités physiques (force, vélocité, résistance, endurance) en même temps. Une grande sollicitation, même chez un athlète entrainé, est toujours suivie d'une période de récupération. De plus, si le travail est d'intensité trop faible il n'y a pas de surcompensation, s'il

est d'intensité constante on observe une stagnation, s'il est d'intensité trop importante ou le temps de récupération trop court il y a une chute des performances et des risques de blessure.

Le travail de développement général doit se faire au tout début du plan afin de pouvoir spécifier dans les semaines suivantes. Cette partie de l'entrainement s'agira de développer et de préparer foncièrement l'objectif au terme du plan. Cela peut être par exemple beaucoup de footings à intensité modérée, de course de vitesse et de musculation de type gainage, abdominaux, etc. Le but étant d'habituer l'organisme à l'effort si le programme est mis en place après une période de relâchement.

Le travail spécifique est celui qui est le plus variable selon l'objectif final. Il s'agit de s'entrainer spécifiquement en tenant compte des caractéristiques et des facteurs de la performance de la compétition choisie. Cette phase permet d'améliorer ses aptitudes physiques, ses qualités de récupération et son niveau de force mentale. Cette phase permet de progresser sur la difficulté technique, l'intensité du travail, la durée en alternance travail/repos pour obtenir une progression constante en évitant les blessures.

La phase relâchement ou récupération d'une durée équivalente à une semaine toutes les 4 à 5 semaines est conseillée en fonction de la durée et de l'intensité du programme. Cette phase permet de progresser sur la difficulté technique, l'intensité du travail, la durée en alternance travail/repos pour obtenir une progression constante en évitant les blessures. De plus, lors de la semaine pré-compétition, une semaine de relâchement ou d'entretien est nécessaire, sans oublier celle de la semaine post-compétition, qui va se dérouler avant le début d'un nouveau cycle d'entraînement, qui sera en majeure partie de la récupération.

Un cycle peut durer entre 5 (microcycle) et 42 (macrocycle) semaines. Le choix du nombre de semaines dépend des choix et motivations du coureur qui sont très variables et complexes. (11)

Un plan d'entrainement au sens général peut aussi inclure l'alimentation ainsi que d'autres facteurs clés de la performance.

<u>Exemple de plan d'entrainement pour un ultra-trail.</u>

La charge d'entrainement pour des épreuves comme par exemple l'UTMB ou le grand raid de la Réunion est importante. En général les plans proposés varient de 4 à 6 séances par semaine sur 8 à 12 semaines pour des sportifs ayant déjà de l'expérience en course. (33)

Tout d'abord pour être qualitatif, il faut connaître et donc mesurer ses zones de travails individuels

- Endurance fondamentale : FC repos + 60 à 70 % de FC réserve
- Endurance active : FC repos + 70 à 80 % de FC réserve

- Autour du seuil anaérobie : FC repos + 80 à 90 % de FC réserve, pour un seuil théorique à 85%
- Vitesse Maximale Aérobie : FC repos + 90 à 100 % de FC réserve

La gestion de l'intensité de l'effort est un élément clé en trail, dont les fréquences cardiaques sont le meilleur reflet. La progression n'est jamais linéaire. Il faut alterner phases de travail et phases de récupération. La récupération fait partie de l'entraînement. On doit la programmer comme une séance. 15 jours à 3 semaines avant une compétition, on diminue fortement les charges (~50%) tout en conservant la même intensité. La pratique d'autres activités aérobies est un atout physiologique et psychologique, et une excellente manière d'éviter les effets délétères à court terme de la répétition des efforts d'ultra endurance à pied.

La séance en endurance fondamentale se fait le plus souvent possible de manière croisée. En course continue, on ne dépasse pas 2h30 à 3h. Ensuite, on bascule sur de la rando-course. Les sorties en rando-course sont indispensables, encore faut-il bien les espacer pour les assimiler et les surcompenser.

A pied, la séance d'endurance fondamentale peut aussi s'accomplir à jeun, à visée bioénergétique et stratégique. Enfin, il est parfois préférable de doubler pour étaler les charges, notamment en périodes de vacances.

A 15 jours-3 semaines de l'événement, mais aussi régulièrement dans l'année, on peut réaliser des blocs de charges sur 2 à 3 jours, appelés également week-end choc.

La séance d'endurance active, correspond souvent à l'intensité spécifique en trail. Elle est donc indispensable. Pour l'ultra-traileur, cette séance peut être réalisée au pacing en se fixant une fourchette de FC à respecter (par exemple 70-75%) quel que soit la nature du terrain.

La séance autour du seuil anaérobie, améliore l'endurance et la consommation maximale d'oxygène, et recule le seuil d'accumulation des lactates. Reculer le seuil a un effet bénéfique sur l'endurance de l'athlète.

La séance de V.M.A (Vitesse Maximale Aérobie) et de VMA ascensionnelle : la VMA est la vitesse qui peut être soutenue en moyenne entre 4 et 7'. C'est la cylindrée de l'athlète. Les séances de VMA sont courues entre 90 et 105 % de la VMA/PMA. La performance en montée est primordiale en trail, donc VMA asc et fraction de VMA asc sur une durée donnée sont à travailler régulièrement.

La séance de renforcement musculaire, voire de développement de la force : la force est définitivement reconnue comme un facteur de performance en trail. On peut comparer le couple force-endurance de force avec le couple VMA-endurance. Elle est donc à développer en spécifique (sur le terrain) et/ou en séance dédiée.

La séance technique de descente (et de montée) : la capacité à répéter des descentes sans perte de temps ni dommages musculaires est une clé de la performance en trail. Il faut travailler sur le musculaire, le technique et l'engagement. Quel que soit le niveau, il faut passer du temps dans les descentes pour y prendre plaisir.

ULTRA TRAIL – Plan sur 12 semaines				
Dominante seuil/VMA	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	Semaine 4 *(repos relatif)*
Jour 1	**VMA asc** 25 mn échauffement + éducatifs + 2-3 accélérations + **2 x (8 x 45s/30s) en côte à ~10-20%, récup 3mn trot inter-séries** + 15 mn récup active (= course)	**VMA** 30 mn échauffement + éducatifs + 2-3 accélérations + **8 x1'/40s** + 2mn récup + **8 x 30s/20s** + 2mn récup + **8 x 15s/15s** +15 mn récup active	**VMA asc** (tous %) 25 mn échauffement **10 x 50m D+ à 90% PMA,**retour trot descente + 10 mn récup active ou Récupération si trail	30' + 10 lignes droites, ou 1h30 vélo
Jour 2	1h 30 EF sur terrain vallonné + **renforcement**	1h 30 EF sur terrain vallonné +**renforcement**	1h sur terrain vallonné + **renforcement**	2h vélo
Jour 3	**Seuil-End active** 30' échft + 2x20mn (récup 4' course lente) avec D+ et D- + 10mn facile	**Seuil** 30' Echft + 4km/3km/2km/1km au GPS de 80 à 90% PMA, récup 3' course + 10' relax.	**Seuil** 30 mn échauffement + 3 x 12mn/3mn à 85% PMA + 15mn récup active	20' Echft + 12 x 30" 30" aux sensations sur terrain plat + 10' relax
Jour 4	Sortie vélo 2h30 ou VTT 2h	Sortie vélo 3h ou VTT 2h15	Sortie vélo 3h ou VTT 2h15-2h30	Repos
Jour 5	1h30 vallonnée aux sensations	Matin : 1h à jeun EF Soir : 1h30 VTT actif	1 h vallonnée	Repos
Jour 6	**Sortie longue** 2h avec 750 m D+ et D- minimum. (ou	**Sortie longue** 2h VTT + 1h30 course avec 500 m D+ et D- minimum	**Sortie Rando-trail de 4h** avec alternance marche et course	Trail de préparation ~30-40km

	1h + renfo + 45 min)		(>1500mD+/-). ***Pacing ~65%***	
Dominante dénivelé ou force	Semaine 5	Semaine 6	Semaine 7	Semaine 8 *(repos relatif)*
Jour 1	Récupération post-course 1h récup active sur vélo/VTT/Home Trainer	**Physio/technique descente** 25 mn échauffement + éducatifs + 2-3 accélérations + **10 x 50m D-** dans descente un peu technique, retour marche active en montée 10 mn récup active	Matin : 1h à jeun Soir : VMA terrain varié 30’ echft + **8 x 3mn/1mn à 90% PMA (ou FC reserve)** + 10 mn facile	30’ + 10 lignes droites, ou 1h30 vélo
Jour 2	Repos	1h 30 EF sur terrain vallonné +**renforcement**	1h sur terrain vallonné + **renforcement**	2h VTT
Jour 3	End fond 50 min footing facile	**Seuil** 30’ Echft + **4 x 8’** seuil continu en côte récup 2’30 course en descente + 15’ trot.	1h15 à jeun	20’ Echft + 8 x 1mn/40s aux sensations + 10’ relax
Jour 4	Repos	Sortie vélo 3h	Sortie vélo 3h	Repos
Jour 5	Repos	Matin : 1h à jeun Soir : 1 h 30 VTT	1 h vallonnée aux sensations	30mn échft + éducatifs + 5 lignes droites

Jour 6	Sortie vélo 60-70 km en end fond	**Sortie longue** 1h VTT en pré-fatigue + 2h course avec 750 m D+ et D- minimum	**Sortie Rando-trail de 6h** avec alternance marche et course (>2000 m D+/-) à basse intensité. ***Pacing ~60%***	Trail de préparation ~40 à 50 km Ou longue sortie vélo/VTT ou enchaînement VTT/course

Dominante économie de course	Semaine 9	Semaine 10	Semaine 11	Semaine 12
Jour 1	récupération active en vélo, HT ou marche	Matin : 1h à jeun Soir : VMA 30mn échauffement + 3 x 9mn d'intervalles (30s éducatif + 30s 100% VMA + 30s trot…), 3mn récup entre les séries + 15mn récup active	Rappel intensité 30' echft + 8 x 1mn30/30s+ 15 mn relax (séance aux sensations)	30mn tranquille
Jour 2	Repos	1h30 EF sur terrain vallonné	1h sur terrain vallonné + **renforcement PPG**	Repos
Jour 3	Repos	**Seuil** 30' Echft + 5 x 6' terrain vallonné récup 2mn course + 15' relax.	1h à jeun	Rappel intensité 10 x 30/30
Jour 4	Repos	REPOS ou légère séance renfo	**REPOS**	Repos
Jour 5	50 min course facile	Matin : 1h à jeun Soir : 2h VTT	REPOS	Routine d'échauffement

Jour 6	Vélo 50-70 km en fréquence	**Sortie Rando-trail de 5h** avec alternance marche et course (>2000 m D+/-) ***Pacing ~60%***	Sortie vélo 3h	**ULTRA Objectif**

Un autre exemple

Ce plan est réalisé pour une préparation de l'UTMB par Bertrand Cochard (Entraîneur Fédéral d'Athlétisme) (34). Il conseil dans son plan, au moins 4 séances d'entrainements hebdomadaire. Durant les deux premiers mois la charge d'entrainement va évoluer de manière croissante. Celle-ci va amener à être capable de boucler une épreuve comme le tour du mont-blanc. Progressivement le corps va apprendre et se modeler à l'effort de longue distance en particulier au niveau de la durée. Pour se faire, il conseille d'intégrer des courses qui seront réalisées en préparation et parfaitement intégrées à l'entrainement. Les épreuves devront être adaptées. Les trails seront nombreux au mois de mai, juin et juillet. Il faudra juste choisir. Une épreuve assez longue (entre 80km et 100kms ou entre 6h et 10h) avec un dénivelé important (entre 4.000m et 5.000m de D+) doit être envisagée entre début mai et fin juin ou tout début juillet. Il est possible de commencer par des épreuves plus courtes au mois de mai.

Le plan suivant comprend des consignes particulières par exemple des mini-blocs de 2 jours permettant de reproduire la fatigue de ce type d'épreuves. Un rappel de VMA sous une forme adaptée est également proposé dans le plan.

Abréviations utilisées : E Étirements, r récupération, RAC Retour Au Calme, R Récupération entre série.

		4 séances / semaine	5 séances / semaine
Semaine 1	Séance 1	1h + renforcement (abdos dorsaux)	1h + renforcement (abdos dorsaux)
	Séance 2	30 min +12 x (30"-30") en côte + 10 x 30" sur le plat r = 30"	30 min +12 x (30"-30") en côte + 10 x 30" sur le plat r = 30"
	Séance 3	Fo 1h30, dont 2x10 Semi r = 3 min	1h15 footing, dont 2x10 Semi r = 3 min
	Séance 4	Sortie 2h30 en rando-course	Fo 1h30 en terrain vallonné
	Séance 5		Sortie 2h30 en rando-course
Semaine 2	Séance 1	1h15 + renforcement (abdos dorsaux)	1h15 + renforcement (abdos dorsaux)
	Séance 2	30 min + 15 x 1 min vite r = 1 min sur chemin (même vallonnée) + RAC 20 min	30 min + 15 x 1 min vite r = 1 min sur chemin (même vallonnée) + RAC 20 min
	Séance 3	Fo 1h45 dont 20 min allure marathon	1h30
	Séance 4	3h rando course	1h30 dont 20min allure marathon + 10min allure semi
	Séance 5		3h rando course
Semaine 3	Séance 1	Fo1h dt 10x100m vite	Fo1h dt 10x100m vite
	Séance 2	30' + 30' montée descente (en allant vite ds la descente et sur le plat) + 10' cool	30' + 30' montée descente (en allant vite ds la descente et sur le plat) + 10' cool
	Séance 3	Fo 1h30' en terrain vallonné	Fo 1h30' en terrain vallonné
	Séance 4	Sortie 4h rando course ou compétition entre 40 et 60 kms	Fo 2h dt 2x15' allure marathon r=3'
	Séance 5		Sortie 4h rando course ou compétition entre 40 et 60 kms
Semaine 4	Séance 1	Fo 1h renforcement musculaire	Fo 1h renforcement musculaire
	Séance 2	30' + 4km de 30"-30" récup rapide 75% de la vitesse des 30" vite + RAC 15'	30' + 4km de 30"-30" récup rapide 75% de la vitesse des 30" vite + RAC 15'
	Séance 3	Fo 2h dt 30' vite en terrain vallonné	Fo 1h30'
	Séance 4	Sortie 4h rando course	Fo 2h dt 30' allure marathon
	Séance 5		Sortie 4h rando course
Semaine 5	Séance 1	Fo 1h renforcement musculaire	Fo 1h renforcement musculaire
	Séance 2	30' + 40' montée descente (en allant vite ds la descente et sur le plat) + 10' cool	30' + 40' montée descente (en allant vite ds la descente et sur le plat) + 10' cool
	Séance 3	Fo 2h30'	Fo 1h30' lent
	Séance 4	Sortie 3h en terrain vallonné	Fo 2h30' dt 30' allure marathon, + 10 allure semi
	Séance 5		Sortie 3h en terrain vallonné
Semaine 6	Séance 1	Fo 1h renforcement musculaire	Fo 1h renforcement musculaire
	Séance 2	30' + 15x30" en côtes + 10x30" vite sur le plat + 15'	30' + 15x30" en côtes + 10x30" vite sur le plat + 15'
	Séance 3	Fo 2h 2ème heure plus vite	Fo 1h30'
	Séance 4	Sortie 5h rando course	Fo 2h 2ème heure plus vite
	Séance 5		Sortie 5h rando course
Semaine 7	Séance 1	Fo 1h15'+ renforcement musculaire	Fo 1h15'+ renforcement musculaire
	Séance 2	30' + 40' montée descente (en allant vite ds la descente et sur le plat) + 10' cool	30' + 40' montée descente (en allant vite ds la descente et sur le plat) + 10' cool
	Séance 3	Fo 1h30'	Fo 1h30'
	Séance 4	Sortie 4h rando course	Fo 2h dt 20' allure marathon
	Séance 5		Sortie 4h rando course
Semaine 8	Séance 1	Fo 1h	Fo 1h
	Séance 2	30' 4km (30"-30") + RAC	30' 4km (30"-30") + RAC
	Séance 3	Fo 1h30'	Fo 1h30'
	Séance 4	Sortie 6h rando course ou compétition	Fo 1h30' dt 20' allure marathon
	Séance 5		Sortie 6h rando course ou compétition

Les deux mois restants sont importants. En revanche la majeure partie de l'entrainement est réalisée et vouloir rattraper le retard est inutile voir dangereux. En effet, les 8 semaines restantes vont servir à peaufiner la préparation. Celle-ci va se scinder en deux parties : 6 semaines (les 6 dernières semaines d'entrainement) et 2 semaines (les 15 derniers jours).

Ne pas hésiter à faire quelques rando-courses en respectant l'heure de départ prévu de l'épreuve, démarrer de nuit ou au soleil couchant sont des moments privilégiés qui seront retrouvé lors de l'épreuve préparé.

Les 15 derniers jours vont permettre de complètement assimiler l'entrainement réalisé. De plus, il faut arriver frais physiquement et mentalement pour aborder un ultra trail. En effet, arriver au terme de la préparation en disant « ouf enfin terminé » cela ne correspond pas à l'objectif de préparation. Certes l'entrainement aura été conséquent, malgré tout il ne faut pas arriver à bout de souffle les 15 derniers jours avant l'épreuve. L'envie de courir doit être présente et l'envie de surmonter tous les problèmes qui peuvent survenir également. Pour cela il est fortement déconseillé toute compétition dans le dernier mois avant l'épreuve.

		4 séances / semaine	5 séances / semaine
Semaine 9	Séance 1	Fo 1h facile	Fo 1h facile
	Séance 2	EE + 12 x (1'-1') en tout terrain	EE + 12 x (1'-1') en tout terrain
	Séance 3	Fo 2h dt 30' de montée descente	Fo 2h dt 30' de montée descente
	Séance 4	Rando course de 4h	Fo 1h15'
	Séance 5		Rando course 4h
Semaine 10	Séance 1	Fo 1h15' + renforcement musculaire	Fo 1h15' + renforcement musculaire
	Séance 2	30' + 20' allure marathon + 10' allure semi + 20' cool	30' + 20' allure marathon + 10' allure semi + 20' cool
	Séance 3	Fo 1h30' cool	Fo 1h30' cool
	Séance 4	Rando course 5h ou compèt maximum 8h	Fo 2h en nature
	Séance 5		Rando course 5h ou compèt maximum 8h
Semaine 11	Séance 1	Fo 1h lent	Fo 1h lent
	Séance 2	EE + 40' montée descente + RAC	EE + 40' montée descente + RAC
	Séance 3	Fo 2h	Fo 1h30' dt 2x10' allure marathon ++
	Séance 4	Rando course 6h ou compèt maxi 8h	Fo 2h
	Séance 5		Rando course 6h ou compèt maxi 8h
Semaine 12	Séance 1	Fo 1h + renforcement musculaire	Fo 1h + renforcement musculaire
	Séance 2	Fo 1h30' dt 15x1' vite r=45''	Fo 1h30' dt 15x1' vite r=45''
	Séance 3	Fo 2h30'	Fo 1h30' dt 3x10' vite allure marathon ++
	Séance 4	Rando course 4h	Fo 2h30'
	Séance 5		Rando course 4h
Semaine 13	Séance 1	Fo 1h + 10x100m vite	Fo 1h + 10x100m vite
	Séance 2	EE + 45' montée descente + RAC	EE + 45' montée descente + RAC
	Séance 3	Fo 1h cool	Fo 1h cool
	Séance 4	Sortie 3h course en nature	Fo 2h
	Séance 5		Sortie 3h course en nature
Semaine 14	Séance 1	Fo 1h + renforcement musculaire	Fo 1h + renforcement musculaire
	Séance 2	EE + 3km de (30 ''-30'') + RAC	EE + 3km de (30 ''-30'') + RAC
	Séance 3	Fo 1h30	Fo 1h30 dont 20' allure marathon ++
	Séance 4	Rando course 3h	Fo 1h30
	Séance 5		Rando course 3h
Semaine 15	Séance 1	Fo 2h	Fo 2h
	Séance 2	Sortie rando course condition de course 5h	Sortie rando course condition de course 5h
	Séance 3	Repos	Repos
	Séance 4	Fo 1h	Fo 1h
	Séance 5		Fo 1h terrain vallonnée
Semaine 16	Séance 1	Repos	Repos
	Séance 2	Sortie rando course 1h30	Sortie rando course 2h
	Séance 3	Repos	Repos
	Séance 4	Repos	Repos
	Séance 5	Course	Course

5.2. Les facteurs de performance

Il y a plusieurs zones d'entrainements définit par la régénération, l'endurance extensive, intensive, l'entrainement au seuil et la VO2max.

La régénération est la zone d'entrainement qui permet de rééquilibrer ou d'accélérer l'organisme, surtout le cœur. Elle est utilisée pour récupérer lors d'entrainements en fractionné mais aussi pour des décrassages et des échauffements.

L'endurance extensive est utilisée lors de la préparation foncière, autrement dit dans la partie du travail de développement général sur plan. Cela consiste à courir à intensité faible et continue pendant 15 à 120 minutes. Cette zone est aussi souvent appliquée lors des échauffements avant une compétition ou avant un fractionné.

L'endurance intensive a elle aussi pour but la préparation foncière, mais aussi l'affûtage pré-compétitif. Elle se travaille par course continue de 30 à 90 minutes et d'intensité moyenne.

L'entrainement au seuil permet d'accroître les niveaux de plusieurs facteurs essentiels de la performance. Elle contribue à une amélioration de la VO2max, à une amélioration de la tolérance à l'acide lactique, à son élimination et une meilleure utilisation du glucose absorbé par l'individu. Le seuil se travaille sous forme de fractionné long : ce sont des séries de 800 à 3000m avec 1 à 2 minutes de récupération entre chaque distance objective, ou, sous forme de temps, des séries de 3 à 15 minutes avec 1 à 2 minutes de récupération. Ce seuil se situe en général à environ 85% de la fréquence cardiaque maximale de l'athlète.

La VO2max est un effort très difficile à maintenir plus de 5 minutes, les sensations sont très désagréables et très exigeant pour l'organisme, il faut donc limiter son nombre de séances par semaine ainsi que sa durée. Cette zone d'entrainement est primordiale car elle va permettre d'accroître les capacités cardiovasculaires et respiratoires grâce à l'effort maximal, faire travailler les capacités de force et de vitesse, utiliser les fibres lentes et rapides et améliorer la résistance de l'athlète. Les gains ne s'arrêtent donc pas à la performance mais s'étendent aussi à la santé du sportif. La meilleure façon de se perfectionner est le fractionné court. Ce sont des séries de 100 à 800 mètres que parcourut le plus rapidement possible avec des récupérations de 2 à 5 minutes.

5.2.1. La VO2max

La VO2max est la quantité d'oxygène que notre corps consomme dans un effort maximal en une minute par kilogramme du corps humain. Elle se mesure en mLO2/min/kg. Cette mesure varie chez chaque individu, en fonction de la quantité de sport effectué, de l'âge, du sexe, des antécédents parentaux (gènes et de la santé et peut être mesurée soit dans un laboratoire, soit par des tests physiques sur une piste d'athlétisme. La mesure en laboratoire sera plus précise. Elle s'entraine et s'améliore grâce à des sérances courtes à intensité élevée (90-105% de la VMA). Si cette VO2max est bien travaillée, l'athlète, visant à courir à une intensité maximale sur toute la durée de la course, se verra bien mieux progresser. Ce travail, indispensable dans tous les types de

course à pied, que ça soit dans l'ultra-trail ou le marathon, il sera mis à l'œuvre lors de la phase de développement général qui, rappelons-le, a pour but d'habituer l'organisme à l'effort après une phase de repos ou de relâchement.

WOMEN

Age (years)	Very poor	Poor	Fair	Average	Good	Very good	Excellent
20-24	< 27	27-31	32-36	37-41	42-46	47-51	>51
25-29	< 26	26-30	31-35	36-40	41-44	45-49	>49
30-34	< 25	25-29	30-33	34-37	38-42	43-46	>46
35-39	< 24	24-27	28-31	32-35	36-40	41-44	>44
40-44	< 22	22-25	26-29	30-33	34-37	38-41	>41
45-49	< 21	21-23	24-27	28-31	32-35	36-38	>38
50-54	< 19	19-22	23-25	26-29	30-32	33-36	>36
55-59	< 18	18-20	21-23	24-27	28-30	31-33	>33
60-65	< 16	16-18	19-21	22-24	25-27	28-30	>30

MEN

Age (years)	Very poor	Poor	Fair	Average	Good	Very good	Excellent
20-24	< 32	32-37	38-43	44-50	51-56	57-62	>62
25-29	< 31	31-35	36-42	43-48	49-53	54-59	>59
30-34	< 29	29-34	35-40	41-45	46-51	52-56	>56
35-39	< 28	28-32	33-38	39-43	44-48	49-54	>54
40-44	< 26	26-31	32-35	36-41	42-46	47-51	>51
45-49	< 25	25-29	30-34	35-39	40-43	44-48	>48
50-54	< 24	24-27	28-32	33-36	37-41	42-46	>46
55-59	< 22	22-26	27-30	31-34	35-39	40-43	>43
60-65	< 21	21-24	25-28	29-32	33-36	37-40	>40

Tableau 7 : les chiffres de la VO2max. Source : http://preventdisease.com/news/articles/vo2_max_how_fit_athlete.shtml

Théoriquement, il existe aussi la VO_2 au seuil aérobie et celle au seuil anaérobie. C'est le moment où le corps au seuil aérobie ne peut plus fournir l'énergie (ATP) aux muscles. La VO_2 maximale quant à elle s'observe durant la phase aérobie. (35)

5.2.2. L'endurance de faible intensité

L'endurance de faible intensité (35) sont des séances où la fréquence cardiaque est plutôt faible par rapport à la maximale. De plus, à la suite de ces séances l'athlète ne doit pas ressentir de la fatigue musculaire. Nombreux coureurs confondent les termes d'endurance active et d'endurance fondamentale. L'endurance active, c'est le fait de courir longtemps sur une longue distance mais à une fréquence cardiaque plutôt élevée (environ 80% de la fréquence cardiaque maximale), tandis que la fondamentale va être relativement lente (60-75%). Les confondre constituent donc une grosse erreur dans l'entrainement car le corps ne récupèrera pas de la même manière.

Encore présent dans les esprits de nombreux sportifs, l'absence de courbature pendant 3 jours après une séance ne traduit pas un entrainement sans valeur. De plus, cela augmenterait de nombreuses blessures incomprises. L'endurance fondamentale est un excellent exercice pour le cœur. Les bénéfices ne s'arrêtent pas là, il faut y rajouter :

- L'amélioration de la circulation sanguine
- Une augmentation du nombre de mitochondries dans les cellules, la mitochondrie étant la « centrale énergétique » de la cellule, cela signifie donc plus d'énergie à disposition de l'organisme
- Une amélioration du débit cardiaque, ce qui signifie que la fréquence cardiaque va baisser pour un effort d'une intensité élevée comparé à l'avant-progression

La recommandation donnée aux coureurs est d'en faire au moins 70% du temps total d'entraînement : « tu t'entraineras trop facile les jours difficiles » (livre Ultra-trail : Plaisir, performance et santé de Guillaume Millet). Ceci résume bien ce que nombreux coureurs font à tort. L'endurance de faible intensité définit le fait de courir lentement pendant longtemps. Or, beaucoup de coureurs augmentent l'intensité de leurs entrainements en endurance afin d'augmenter les sensations ou alors ils imaginent en conclure à une meilleure progression. Mais ce cas n'a pas été prouvé, donc les gains imaginés sont incertains, et pourraient avoir un effet négatif dans l'entrainement et accumuler de la fatigue. Qui dit fatigue, dit baisse d'intensité aux entrainements difficiles, et peut même aussi augmenter le risque d'une blessure.

5.2.3. La technique de course et de marche

Il existe plusieurs techniques de course et de marche pour l'ultra-trail, des techniques de descente et de montée. Ces techniques ont été créées pour faire face aux portions de fortes dénivellations et adaptées à l'environnement de ces courses. L'utilisation de techniques est nécessaire, car elles permettent de gagner du temps et d'économiser de l'énergie. Elles ont donc d'une efficacité non négligeable. De plus, ces techniques permettent aussi d'éviter de se blesser à cause des risques liés à l'environnement.

La course en montée impose au coureur de soulever son centre de gravité et de porter son poids de corps vers le haut. En pratique, chaque appui au sol est plus haut que l'appui précédent. Techniquement parlant, la course en montée engendre, lors de la phase d'appui, une plus grande flexion des articulations de la cheville, des genoux et des hanches par rapport à la course sur terrain plat. Lors de la phase de poussée, l'extension de ces trois articulations est bien sûr plus grande avec une intervention plus importante des quadriceps et des mollets. Plus le pourcentage de la montée est important, plus l'articulation de la hanche intervient dans le travail. Par exemple, pour un pourcentage de 12%, le travail de l'articulation représente 75% du travail global des trois articulations.

Une première technique de montée, lorsque le dénivelé n'est pas trop fort, consiste à porter légèrement les épaules et le buste vers l'avant pour avancer le centre de gravité par rapport à la pente, relâcher les bras et effectuer de petites foulées très souples à un rythme régulier et tant que ça ne tire pas trop sur les mollets, poser le pied à plat. Cependant, il est préférable, tant que c'est possible, de ne pas trop fléchir le buste sous peine de réduire le volume de la cage thoracique et des poumons. Plus le dénivelé augmente, plus l'amplitude des pas et le temps de contact au sol diminue afin de mieux "accrocher" la pente.

Une deuxième technique devient essentielle lorsque le dénivelé est très important, c'est-à-dire à partir de 15-20%, car elle permet d'économiser plus d'énergie. Cette technique emploie aussi l'inclinaison du buste vers l'avant mais encore plus forte, presque parallèle au sol. Les bras sont posés sur les cuisses, au-dessus des genoux, cela permet d'avoir un appui plus solide. Le talon trouve un point d'appui le plus haut possible pour permettre au coureur d'avoir cet appui plus solide tout en posant les mains sur les cuisses pour effectuer le pas suivant de manière plus efficace, avec une plus grande amplitude. Les pas de cette technique de marche ont une fréquence très basse, ce qui est dû à cette même amplitude.

Dans le trail il y a de la montée mais aussi du plat et de la descente. La course en descente répond à une technique bien particulière qui doit être entraînée pour être améliorée. Autrement dit, il s'agit d'un travail spécifique qui demande de la pratique.

La pose du pied au sol doit se faire par le médio-pied avec la recherche d'une pose de pied à plat, évitant surtout un contact direct par le talon qui risque d'être traumatisant pour le dos et la colonne vertébrale. Cette pose du pied particulière va favoriser une foulée qui se veut moins ample et plus fréquente. Cette foulée plus courte et plus en fréquence va permettre de limiter la force des impacts à chaque appui et de contrôler ses appuis pour plus de stabilité. Sur les pentes les plus raides et techniques, il est même conseillé de privilégier des appuis avec déplacements latéraux avec une pose des pieds déportée vers l'extérieur par rapport à l'axe du corps. Afin d'être bien équilibré en descente, le haut du corps doit être porté vers l'avant de sorte à ce que le buste et le bassin soient perpendiculaires au sol. Cette orientation du corps diminue les tensions au niveau des cuisses et améliore l'adhérence au sol. Pour abaisser le centre de gravité il faut fléchir les genoux comme si on voulait un peu s'asseoir. Mettre les mains en avant des genoux peut aider dans cette recherche d'abaisser le centre de gravité. Il est très important d'éviter une foulée bondissante et traumatisante afin de limiter les oscillations verticales du centre de gravité. Le déplacement de ce dernier doit être le plus linéaire possible avec une avancée rectiligne. De plus, la lecture visuelle est particulièrement importante en descente afin d'anticiper les aspérités du terrain. Pour cela, le regard doit être porté en avant de ses pieds, idéalement entre 3 et 4 mètres devant soi.
En ce qu'il s'agit des bras, ils vont jouer un rôle plus équilibreur et stabilisateur que moteur. Les coudes doivent être très légèrement écartés du corps avec les avant-bras légèrement vers l'intérieur. Lorsque la vitesse

augmente, ou dans les virages, une position des bras un peu plus écartée avec des coudes légèrement relevés permettra de maintenir l'équilibre. Un relâchement physique comme mental permettra d'éliminer toutes les tensions qui n'ont pas lieu d'être comme celles des épaules, des trapèzes et de la nuque. Le haut du corps doit être le plus souple et le plus fluide possible pendant la course, tout comme la respiration qui ne doit en aucun cas être bloquée. Pour les virages, ils doivent être abordés par l'extérieur avant de repiquer vers l'intérieur, pour en sortir par l'extérieur.

Les techniques de course et de marche sont des facteurs très importants de l'ultra-trail, car elles permettent non seulement d'aller plus vite, d'éviter les blessures, mais aussi de faire économiser de l'énergie aux coureurs, cette efficacité est d'autant plus importante lorsque d'autres facteurs comme l'alimentation, le sommeil ou l'endurance de faible intensité sont également bien gérés et entrainés.

5.2.4. La musculation

La crainte de certains coureurs, c'est de prendre du poids. C'est ce que beaucoup d'adeptes de la musculation cherchent à faire. Plus de masse, signifie plus de poids à porter. Dans le cas des coureurs de longue distance ce n'est pas ce que l'on va chercher à faire. La musculation qui bénéfique pour les coureurs de trail est :

- Le renforcement abdominal
- La préparation physique générale (PPG)
- La musculation lourde
- La musculation sur le terrain
- L'électrostimulation

Le renforcement abdominal, ou plutôt lombaire, comprend principalement le gainage. Il est souvent négligé par certains coureurs amateurs. Les flexions traditionnelles sont moins intéressantes pour un coureur à pied. Une meilleure transmission des forces entre le haut et le bas du corps va permettre d'avoir un meilleur coût énergétique, éviter les douleurs lombaires et être plus fort. Cette pratique se fait normalement dans une période de préparation générale dans le plan d'entraînement. (36)

La préparation physique générale est particulièrement adoptée lors de la reprise d'une coupure, mais elle peut aussi faire partie d'un programme d'entraînement. Comme son nom l'indique, elle va concerner l'ensemble des muscles. Le circuit-training est un excellent mode. Il s'agit d'un circuit de plusieurs types d'efforts sous forme de travail à intermittence. Le circuit training dit « classique » est composé de 2 à 3 tours comprenant 9

à 12 ateliers avec 30 secondes d'effort suivies de 30 secondes de récupérations, plusieurs variantes existent. Un grand avantage du circuit-training est qu'il peut être ludique, avec la possibilité de le faire à plusieurs.

La musculation lourde, c'est là où la prise de masse musculaire est une crainte. Certains gabarits tirent bénéfices d'une légère prise de masse sur les jambes alors que d'autres déjà « massifs » n'en est que désavantagés. Il faut donc individualiser. La musculation n'est pas le sport principal du traileur. Un traileur cherche à avoir une force optimale dans le but d'amélioration la performance. Musculation lourde ne signifie pas forcément prise de poids. Cette musculation lourde se nomme aussi, travail en concentrique.

Le crossfit par exemple pourrait être un bon complément au trail. Cette dernière discipline est devenue un sport populaire. C'est un mélange de cardio trainning, d'haltérophilie et de gymnastique. L'avantage est la convivialité de ce sport qui se fait à plusieurs et les mouvements qui mobilisent plusieurs muscles à la fois. Cela demande davantage d'énergie que de travailler en isolation. Le bas du corps ou les muscles les plus puissants du corps sont particulièrement sollicité au cours des séances ainsi que le gainage et le haut du corps qui est très peu travaillé dans le trail. Le WOD crossfit (Workout Of the Day) correspond à une séance et se découpe de la manière suivante : l'échauffement (warm up), le Skill, (exercices à répéter), le WOD du jour, un entrainement à haute intensité alternant des cardio et de force et le Cool Down (la récupération et les étirements). Chaque jour ce WOD change, ce qui permet de varier l'entrainement. Ce sont des exercices cardio qui font gagner en endurance et en aisance respiratoire, en alternant haute intensité et repos. Cela permet le développement musculaire, de la puissance, la vitesse, la souplesse, l'équilibre, l'agilité et la coordination. Cela permet donc de travailler la préparation physique générale et la musculation lourde.

La musculation sur le terrain peut se faire avec par exemple des entrainements avec des sacs de plus en plus lourds. Il y a évidemment d'autres techniques comme de l'entraînement en descente, en côte, sur la neige, sur l'herbe, à pieds nus…

L'électrostimulation est aujourd'hui très utilisée dans le cadre sportif et médical. Elle permet de reproduire des processus de déclenchement des muscles (ce que les coureurs font à l'effort) sans solliciter le système nerveux central, c'est-à-dire sans engendrer de fatigue à l'aide d'impulsions électriques. Les programmes d'entraînements qui intéressent le coureur d'ultra-trail sont les programmes de préparation physique (endurance et force), de récupérations et de préventions des blessures. L'électrostimulation ne vaut pas en matière de progression et de gains la musculation traditionnelle. (37)

D'autres facteurs tels l'alimentation, la technique de course, les ressources mentales, le sommeil, l'entrainement en haute altitude, et encore la tactique de course ne sont pas à négliger.

5.2.5. La tactique de course

Dans ultra-trail, il n'y a pas que la performance physique qui permet de gagner une épreuve ou de la finir. Le coureur doit savoir gérer sa course, adopter une certaine tactique et avoir le matériel adéquat. La tactique peut se diviser en deux parties : la tactique avant et pendant la course.

La tactique (38) avant la course sert à s'y préparer en achetant tout le matériel nécessaire, en organisant le voyage : le logement et le transport. Préparer ses ravitaillements (boissons et aliments) et ses produits énergétiques pour sportif. Afin d'éviter tout problème digestif lors de l'épreuve, tous les aliments doivent déjà avoir été testés lors de l'entraînement. De plus, il est conseillé d'avoir étudié le parcours de la course à l'avance. Ceci est valable pour les ultra-trail de 2-3 jours maximums. Pour l'AMT (annapurna mandala trail) par exemple, prévoir chaque jour des 11 étapes qui la compose est compliqué. Il faut s'adapter aux conditions de vie du pays et c'est le cas pour les ravitaillements qui se feront avec ce qui est disponible (sneakers, biscuits, coca-cola, fruits sec, poulets, œufs, pates…) et l'adaptation du parcours en fonction des chemins praticable au moment de la course.

La tactique pendant la course consiste à avoir l'aptitude de gérer son effort et savoir lorsqu'il faut accélérer ou ralentir son allure afin d'économiser au maximum son énergie.

5.2.6. Le cout énergétique

Le coût énergétique est défini par l'énergie dépensée par un coureur pour parcourir une distance donnée. Il s'exprime en J/kg/km. Deux coureurs ayant les mêmes qualités physiques vont se départager par leur coût énergétique (plus il est faible, mieux c'est). Il existe de nombreuse manière de réduire ce coût énergétique, notamment par : le travail explosif, le travail pliométrique, le travail mécanique, le relâchement, la technique de course, l'économie de la locomotion et le simple fait de courir.

Pendant l'effort, le coût énergétique dépend du travail des muscles. Ce travail se divise en deux parties : le travail excentrique (le muscle s'allonge) et le travail concentrique (le muscle se raccourcit). Le travail concentrique utilise 3 à 5 fois plus d'énergie que celui excentrique. Plus le dénivelé est élevé et positif, plus le travail concentrique sera sollicité, et il est question de l'inverse pour un dénivelé négatif.

Le travail explosif se travail en pratiquant la musculation. Il consiste à soulever très rapidement des charges de poids suffisamment lourdes pour que cette même charge ne puisse pas être soulevée lentement et elle doit être redescendue lentement.

Le travail pliométrique est lui aussi associé à la musculation, mais pas en salle. Il est défini par un mouvement musculaire qui passe instantanément de la phase excentrique à celle concentrique (par exemple lorsque l'on fait deux sauts de suite). Il permet d'améliorer la croissance musculaire et la qualité des fibres musculaires.

L'énergie mécanique du coureur a un centre de gravité qui change à chacun de ses pas. Cette énergie se nomme l'énergie mécanique externe et elle ne va pas aider à l'amélioration du coût énergétique. L'énergie mécanique interne, c'est par exemple la force musculaire des mollets comparativement aux cuisses en mouvement, ou alors encore le poids des chaussures comparé au gabarit du coureur, qui sont adaptées à la recherche de la performance. Cette énergie mécanique interne est utile pour l'amélioration du coût énergétique.

Il est important de relâcher ses muscles en courant, que ce soit ceux des épaules, des avant-bras et même ceux des joues ou de la mâchoire par exemple. Nombreux coureurs ne le font pas et sont même souvent inconscients de la tension de leurs propres muscles. Le meilleur moyen de se relâcher est de respirer constamment avec amplitude.

En trail, la technique de course est importante. Le sol n'est pas constamment le même et l'énergie stockée lors de la phase excentrique sera en majorité perdue. De plus, dans l'ultra-trail, la vitesse est lente proportionnellement à celle du marathon par exemple et cela s'explique par la différence de distance et de dénivelé.

S'entrainer à courir est donc la meilleure façon de réduire son coût énergétique, mais c'est à long terme que le bénéfice sera constaté.

Il existe plusieurs techniques de course et de marche, de descente et de montée pour l'ultra-trail. Ces techniques ont été créées pour faire face aux portions de fortes dénivellations et pour s'adapter à l'environnement de ces courses. L'utilisation de techniques est nécessaire, car elles permettent de gagner du temps, d'économiser de l'énergie et éviter les blessures, ce qui est primordial.

5.2.7. L'adaptation du corps à l'exercice

C'est l'ensemble des mécanismes qui ont pour objectif de retrouver l'état initial après un effort. Il y a deux types d'adaptations. L'adaptation aigue qui est la mise en jeu de processus de ré-équilibrations cellulaires qui permettent de refaire les réserves épuisées lors de la séance et le renforcement des systèmes fonctionnels engagés dans l'exercice grâce à une alimentation adéquate. L'adaptation chronique qui est la modifications fonctionnelles et structurelles de l'organisme suite à la répétition de sollicitations spécifiques dont l'objectif est de répondre le mieux possible à la sollicitation imposée pour améliorer la performance. (11)

Les phénomènes d'adaptation sont spécifiques (d'une voie énergétique, d'un type de fibre musculaire...), non spécifiques mais locaux (au niveau du muscle) ou non spécifiques et généraux (capacités cardio-vasculaires) et commencent dans les minutes après l'arrêt de l'exercice, dans les heures ou les jours qui suivent.

Il existe une relation entre adaptation aigue et chronique c'est le phénomène de surcompensation. Lors de la phase d'adaptation aigue, l'organisme est capable de restaurer ses capacités physiologiques au-delà de leur niveau de départ. L'accumulation régulière de phases d'adaptations aigues entraine à la longue une amélioration durable des capacités du corps à supporter l'effort, qui représente l'adaptation chronique.

L'oxygène consommé pendant la phase de récupération pour restaurer toutes les fonctions physiologiques perturbées par l'exercice corresponds à un laps de temps pendant lequel la fréquence cardiaque redescend progressivement après l'effort.

La quantité d'oxygène consommée lors d'un effort modéré sans formation d'acide lactique permet la restauration des voies anaérobie alactique et aérobie. Les efforts intenses et brefs se terminent en quelques minutes et ont pour conséquences la resynthèse de la créatine phosphate et une diminution rapide du rythme cardiaque dans les secondes qui suivent l'arrêt de l'exercice. Les efforts modérés de longue durée restaurent les réserves en glucose, glycogène, acides gras et protéines utilisées lors de l'exercice. Les exercices, d'intensité élevée maintenus dits « de résistance », épuisent les réserves en glycogène et favorisent l'accumulation de lactate dans le sang. Cela permet la restauration des réserves de glycogène et l'élimination du lactate présent pendant 1 à 72 heures en fonction du degré d'usure des réserves.

En pratique, dans la grande majorité des cas, la dette est une combinaison de composantes lactique et alactique. Plus l'effort est long et se situe au seuil anaérobie, et plus la récupération est longue.

Il y a une adaptation musculaire à l'exercice. Le niveau d'activité influence le volume musculaire total, l'homéostasie glucidique, les propriétés métaboliques et contractiles des muscles et leur évolution en fonction des différentes étapes de la vie. La typologie musculaire se modifie en fonction de 3 facteurs principaux, le type de stimulation nerveuse, la nature des contraintes mécaniques, la réponse hormonale à l'effort et la nutrition. Après un effort, il y a une régénération par les cellules satellites des muscles pour réparer les microlésions engendrées. Cela entraine une augmentation du volume des fibres cellulaires existantes (hypertrophie) et/ou une augmentation du nombre de fibres musculaires (hyperplasie). Les facteurs influençant la plasticité musculaire sont la stimulation nerveuse en augmentant la concentration en Ca++ intramusculaire, les contraintes mécaniques en activant des facteurs de transduction, régulant les gènes de mitose des cellules musculaires par les intégrines, les facteurs métaboliques : le rapport ADP/ATP (synthèse mitochondriales), hypoxie (micro vascularisation), les facteurs hormonaux avec les hormones thyroïdiennes dont GH qui favorisent la synthèse des fibres musculaires rapides et les facteurs nutritionnels pas les apports protéiques et caloriques.

Après un entrainement en force le muscle répond en augmentant les synthèses protéiques et s'oriente vers des fibres de type II pour augmenter la masse musculaire et créer une hypertrophie des éléments cellulaires, une meilleure synchronisation des unités motrices et améliorer les capacités du muscle à délivrer de la force.

L'entrainement en endurance permet d'améliorer des capacités métaboliques du muscle sa résistance à la fatigue. Ce type d'entrainement permet la formation vers des fibres orienté type I, l'augmentation du pool musculaire de mitochondries et de la micro vascularisation. Ces entrainements aérobies permettent aussi une adaptation au niveau cardiovasculaire et ainsi faire des modifications au niveau du cœur, du système cardiovasculaire, de la composition du sang et de la pression sanguine. L'accroissement du cœur se fait par l'augmentation de la dimension des cavités et de l'épaisseur des parois, le potentiel d'action est allongé et le contrôle vagal sur l'activité cardiaque est amélioré. Les conséquences de cette adaptation cardiaque sont : le maintien de la fonction systolique et l'amélioration de la fonction diastolique, induisant une augmentation du débit cardiaque, la diminution de la fréquence cardiaque au repos et une augmentation moins importante de la fréquence cardiaque lors d'une sollicitation musculaire.

Le réseau sanguin aussi s'adapte et se développe. Il y a une augmentation du nombre de capillaires autour de chaque fibre musculaire, quel que soit le type de fibre musculaire, une augmentation du nombre de collatérales et une augmentation de la souplesse des parois veineuses et artérielles due aux contraintes mécaniques et à l'hyperthermie qui favorisent la synthèse du VEGF et la production de NO à effet vasodilatateur.

Au niveau de la composition du sang, il y a une augmentation du volume sanguin (1 à 2 litres), une diminution du taux d'hématocrite, une augmentation des capacités de déformation des hématies et une diminution de l'agrégation plaquettaire. Cela crée une augmentation de la capacité de transport de l'O2, une diminution de la viscosité du sang et meilleure distribution de la masse sanguine, l'amélioration de la thermorégulation et de la capacité de tampon du sang et l'augmentation de la quantité de lymphocytes pour une meilleure défense de l'organisme.

Du point de vu métabolique, les entrainements en endurance ou aérobie augmentent l'assimilation glucidique par les muscles par l'augmentation des transporteurs membranaires musculaires en glucose, l'augmentation de la lipolyse en augmentant la capacité d'oxydation lipidique par accroissement de l'équipement enzymatique, l'augmentation du stockage en glycogène et de la glycolyse aérobie et anaérobie musculaire et l'amélioration des systèmes de défense contre le stress oxydant (GSH). De plus, les tissus périphériques ont une meilleure sensibilité aux hormones et à l'insuline.

L'entrainement induit des réactions inflammatoires qui stimule le système immunitaire et permet l'augmentation du nombre total de leucocytes circulants (polynucléaires et mononucléaires), l'augmentation de la fonction des cellules NK pendant l'exercice et la phase de récupération, l'augmentation des fonctions des neutrophiles et l'augmentation des taux de cytokines.

Pour réaliser un ultra-trail il est donc nécessaire de s'entrainer et suivre un plan spécifique à ce type d'épreuve pour préparer son corps, son métabolisme et ses muscles à ce type d'effort traumatisant pour quelqu'un de mal préparé. La répétition, l'intensité, l'endurance et l'hygiène de vie sont les bases de cette discipline.

5.2.8. Le mental

Le mental est très important dans tous les sports d'endurance et dans tous les sports en général, car qui dit sport dit dépassement de soi, donner son maximum et c'est encore plus réel en ultra-trail où les coureurs parcourent des distances considérables qui en plus sont en pleine nature où ils doivent affronter les obstacles de l'environnement et la météo. Lorsque les coureurs progressent dans les distances qu'ils parcourent, c'est-à-dire qu'ils passent de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres jusqu'à des ultra-trails de plus de 80 km, ils doivent se demander au départ des courses s'ils vont parvenir à la terminer. A ce niveau de distance-là, lorsque les jambes fatiguent et sont lourdes, c'est le mental qui intervient et qui selon le coureur, permet d'accepter la douleur et de terminer la course ou même de la remporter pour les meilleurs. Le mental est une obligation pour pouvoir terminer des compétitions d'aussi grandes distances parce que la fatigue et la douleur sont rapidement là. C'est aussi un facteur qui se travaille, plusieurs mois avant l'épreuve. Il y a la préparation mentale avant la course, le mental pendant la course, et celui après l'effort. Lorsque l'on parle de mental dans les courses d'ultra-trail, on parle aussi de motivation, car les coureurs n'ont pas tous les mêmes motivations à participer à des ultra-trails. Il y a aussi la motivation pendant l'épreuve, le fait de s'encourager pour pouvoir terminer la course.

L'entraînement du mental avant la course, fait en réalité déjà partie de la préparation physique, car rien que le le programme d'entraînement des coureurs permet de déterminer les différents types de coureurs, les différents types de mental qu'ils ont. Un coureur qui va s'entrainer plus intensément et régulièrement en aura évidemment un meilleur mental, mais aussi plus de motivation à s'améliorer qu'un autre coureur s'entrainant moins souvent, parce que la préparation à l'ultra-trail est difficile, longue et nécessite beaucoup de persévérance.

Le départ d'une course peut être un soulagement, une douce euphorie ou un stress. Au fil des kilomètres le corps a besoin de motivation. Pour cela, certains coureurs visionnent dans leurs esprits les étapes intermédiaires par exemple un sommet, un ravitaillement, une descente... En découpant la difficulté, cela se maintient dans le domaine du possible et fait moins peur. Certains se diront aussi qu'ils n'ont jamais été aussi près de l'atteinte de leurs objectifs et que les efforts restant à produire ne sont rien par rapport à ceux effectués pendant la longue préparation qui a été faite. En cas de difficultés et de risque de craquer mentalement, des coureurs essayent de visualiser la sensation positive qu'ils auront en parvenant à cet objectif mérité et les efforts pour arriver jusque-là, d'autres vont se répéter intérieurement « je vais le faire » et non pas « je peux

le faire ». La motivation de chaque coureur est différente. Il y a ceux attirés par l'argent et la gloire, bien que le milieu de l'ultra-trail ne soit pas très médiatisé et ne propose pas de grosses primes pour les vainqueurs. Il y a les athlètes de circonstances, qui font l'épreuve parce qu'un proche y participe aussi, qui viennent pour l'ambiance de l'épreuve, l'aspect festif ou tout simplement pour oublier le quotidien de leur vie habituelle. Et il y a des passionnés, ceux qui se donnent à fond pour le plaisir et qui se fixent des objectifs élevés pour repousser leurs limites.

Une fois l'euphorie de l'arrivée passée, le sportif peut ressentir parfois un petit coup de blues : la tension retombe, l'adrénaline est évacuée. Le mental après la course consiste à profiter du plaisir d'avoir réussi son objectif, échanger son ressenti et ses émotions avec d'autres coureurs et son entourage. Pour ceux ayant manqués leurs objectifs, il faut se remettre en question, réfléchir aux facteurs qui leurs ont amené à le manquer et essayer de les améliorer. Puis il faut se fixer de nouveaux objectifs, les varier et être atteignables. La motivation vient aussi de la découverte et de la nouveauté qui est créatrice d'intérêt et d'excitation.

5.2.9. Le sommeil

Le sommeil au quotidien est un des principaux facteurs qui différencie l'athlète professionnel de l'amateur dans le sport en général, faute de temps chez les amateurs. Il sert principalement à réparer les tissus lésés, reformer les réserves, stocker les nouvelles informations... Chaque individu a besoin d'une certaine durée de sommeil par nuit. Il se trouve que des gens ont constamment besoin de 9 heures de sommeil par nuit alors que 6 heures suffiraient pour d'autres (la moyenne chez les adultes se situant à 7 heures). Une quantité minimale de sommeil est donc requise mais à cela s'ajoute un critère de qualité pour pouvoir être en bonne condition.

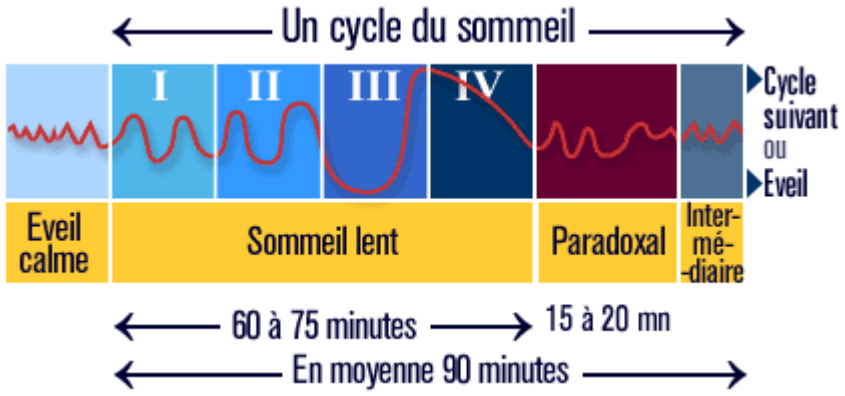


Figure 25 : le cycle du sommeil.

Il y a plusieurs phases dans le sommeil. Le sommeil lent est divisé en 4 parties : ces stades passent de l'endormissement au sommeil très profond, en passant par le sommeil léger et le sommeil profond. La phase paradoxale est plus intense au niveau cérébral. C'est la phase où les rêves dont on se souvient se réalisent. La phase intermédiaire est courte, et s'enchaine de micro-réveils débouchant soit sur un réveil définitif, soit sur un nouveau cycle.

Le sommeil est indispensable pour récupérer de la fatigue physique, et augmenter ses capacités d'apprentissage, il est contrôlé par la production de mélatonine secrétée en début de soirée, avec un pic vers 3 heures du matin. Durant ces cycles de 90 minutes le sommeil lent permet la récupération de la fatigue physique, sécrétion de GH qui stimule les mécanismes anabolisants, plus long entre 23 H et 2 H et le sommeil paradoxal permet la récupération de la fatigue nerveuse (rêves). L'activité athlétique accentue le sommeil lent profond. L'entrainement physique intense prolonge le temps de sommeil, et en modifie la qualité afin d'augmenter la phase de récupération musculaire, le sportif s'endort plus vite et son sommeil paradoxal (rêve) est plus court. De plus, si l'activité physique est menée trop tard dans la journée, elle peut perturber l'endormissement, du fait d'une température corporelle trop importante. (39)

Les conditions pour une récupération optimale

- Préférer les entrainements en fin d'après-midi plutôt qu'en soirée
- Respecter son horloge biologique
- Nuit de sommeil ininterrompue de 7-8H
- Coucher au plus tard à 23H, pour profiter pleinement du sommeil réparateur (sommeil lent profond)
- Pas de repas trop riche, notamment en protéines, le soir ; les glucides devront donc constituer l'essentiel du dîner.
- Laisser deux heures, après la fin du repas, sans activité´ intense avant de se mettre au lit.
- Ne jamais prendre de somnifère sans avis médical. Ce traitement ne résout rien sur le long terme, au contraire, et il peut interférer avec les tests anti-dopage
- Éviter les excitants le soir : café, thé, vitamine C, coca-cola...
- La chambre ne doit pas être trop chaude (plutôt 17°-19°C).

<u>Le sommeil pendant un ultra-trail</u>

Chaque ultra-trail ne nécessite pas forcement de temps de sommeil durant l'épreuve, surtout celles se déroulant en une seule et même étape. Le plus important étant de ne pas se présenter sur la ligne de départ avec une dette de sommeil. Certains coureurs se sont déjà entrainés à ne pas dormir. Mais souvent, comme à l'Ultra-Trail du Mont-Blanc, pour lequel les résultats se situent entre 20 et 40 heures environ, le sommeil est inévitable pour la grande majorité des coureurs. La solution est d'abord de bien gérer sa fatigue et ensuite de ne pas

hésiter à faire de petites siestes de 20 minutes pour rester dans le sommeil réparateur lent profond et ne pas sombrer dans le sommeil paradoxal. Les gains de performance sont alors assurés même s'il faut parfois attendre quelques heures avant de les constater.

Pour les courses de plusieurs étapes comme l'AMT, il faut s'adapter aux conditions de vie et climatique du pays. En ce qui concerne l'AMT 2018 par exemple, les différents lodges des 11 étapes n'étaient pas tous de la même « qualité ». Il faut savoir s'adapter et dormir par exemple sur des lits composés d'une planche de bois ou encore à des imprévus tels que dormir au sol dans le monastère de Mu Gompa à 3900m d'altitude. La qualité du sommeil est impactée et en conséquence la course du lendemain aussi.



Figure 26 : AMT 2019, nuit à Mu Gompa, 3900m d'altitude.

5.2.10. L'entrainement en haute altitude

L'entraînement en haute altitude est important car il permet au corps de s'habituer à courir avec un manque d'oxygène, et permettra donc au coureur d'être meilleur lors des (portions de) courses se déroulant en haute montagne. S'entrainer en altitude permet de multiplier le nombre de globules rouges, et de ce fait permettre au sang d'être plus chargé en oxygène. Cependant, lorsqu'un coureur veut en faire il est conseillé de demander l'avis d'un spécialiste de l'entraînement en haute altitude pour en connaitre les inconvénients ou même demander à être suivi par ce dernier pour permettre au coureur de comparer ses résultats d'un entraînement normal avec les résultats de l'entraînement en altitude. Le séjour doit durer au minimum 2 à 3 semaines, mais peut aussi se faire sous forme de week-ends pour permettre au coureur d'avoir des résultats bénéfiques. Le coureur doit prendre le temps dans l'entrainement de laisser son corps s'habituer à l'altitude, il doit donc se

faire crescendo avec au début une allure à faible vitesse et un temps de récupération plus long, au fil des jours, une allure plus rapide. Il est important d'avoir une certaine expérience de coureur avant de faire ces stages sous peine d'être incapable de tenir le rythme de l'entraînement. Pour bien gérer son entraînement de manière progressive, l'utilisation d'un cardio-fréquencemètre peut être utile pour ne pas se fatiguer trop vite. A cause de la pression de l'air, le corps se déshydrate plus rapidement, il est donc important de bien s'hydrater et d'avoir constamment de l'eau sur soi lors de l'entraînement. Ainsi, les périodes de récupérations doivent être prolongés par rapport à l'entraînement « normal » en basse altitude. L'entraînement en haute altitude ne doit pas se faire trop longtemps avant la compétition au risque de perdre les bénéfices acquis. Pourquoi pas faire ces stages sur le lieu de la course quelques jours avant le départ pour s'habituer à l'environnement et à l'altitude ainsi que pour faire des repérages sur les difficultés de la course. (40)

L'entraînement en haute altitude a pour conséquence plusieurs bienfaits sur le corps et la condition physique du coureur. Le manque d'oxygène en haute altitude permet au coureur d'améliorer plusieurs facteurs importants :

- La résistance anaérobie lactique, c'est-à-dire la performance sur de courtes distances à forte intensité (de 200 à 3000 mètres)
- Le transport d'oxygène vers les fibres musculaires
- L'efficacité de la respiration, la capacité pulmonaire, la VO_2 max

5.2.11. L'alimentation

Support de la performance sportive, l'alimentation en trail, en lien avec les facteurs technico-tactiques, psychologiques (la gestion du stress, angoisse, anxiété…), cognitifs (concentration), environnementaux, hygiéniques (sommeil, fatigue, la gestion de la fatigue), est capable d'interagir positivement ou négativement selon la quantité et la qualité de l'apport en fonction des besoins liés à l'effort. L'alimentation tient donc une place importante dans l'ultra-trail, car avec les dizaines de kilomètres et les dizaines d'heures de course, les coureurs ont régulièrement besoin de s'alimenter. Sans énergie il est impossible de courir.

Les règles de bases d'une alimentation équilibrée sont (41) :

- Les glucides sont le carburant principal de l'effort. Ils sont les stocks en glycogène et permettent de réaliser des efforts endurants et de nourrir le système nerveux central, grand consommateur de glucose. Ils ont un rôle dans le métabolisme protéique en permettant de préserver les protéines musculaires ainsi que dans l'utilisation des lipides à des fins énergétiques. Les glucides non consommés au cours de l'activité physique sont transformés et stockés sous forme de lipides.

- Les protéines sont constituées d'acides aminé qui servent à la synthèse de la structure interne des cellules et aux activités enzymatiques. Elles ont un rôle plus faible dans l'apport énergétique aux muscles mais indispensable pour la restauration des micro-traumatismes subis au cours de l'effort.
- Les lipides sont des acides gras libres. Les acides gras saturés sont d'origine animal et augmentent le taux sanguin de « mauvais cholestérol ». Les acides gras mono-insaturés augmentent le taux de LDL-cholestérol. Les acides gras polyinsaturés sont les oméga 3 et 6 et sont essentiels car ils ne peuvent pas être synthétisés par l'organisme. Les triglycérides sont les principales molécules de stockage des graisses dans les cellules adipeuses. Les stérols sont d'origines végétales. Les lipides permettent de construire des membranes cellulaires, des fibres nerveuses, des hormones stéroïdiennes, le transport des vitamines A,D,E,K et une sources importante d'énergie essentielle chez le sportif.
- Les vitamines liposolubles A,D,E,K sont stockées de manière abondante dans l'organisme, les carences sont rares et leur supplémentation peuvent aboutir à des réactions toxiques. Les vitamines hydrosolubles sont des vitamines du groupe B et C, leurs carences sont fréquentes chez les sportifs, peu toxiques et leur supplémentation peuvent être envisagées pour le sportif ayant une activité intensive.
- Les sels minéraux sont des composés chimiques inorganique qui jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement cellulaire. Ils sont perdus dans la sueur au cours des exercices longs et/ou intense. Leurs carences sont possibles. Le calcium permet la construction des os et des dents, la contraction musculaire, les apports journaliers se font par l'ingestion de produits laitiers mais souvent carencé chez le sportif s'entrainant intensément. Le phosphore permet aussi la formation des os et des dents, il est apporté par la viande, le poisson, la volaille, les produits laitiers, les céréales et les déficits sont rares chez le sportif. Le magnésium est un cofacteur pour les enzymes du métabolisme énergétique, les apports journaliers sont dans les fruits de mer et des légumes à feuilles vertes, les carences sont fréquentes chez le sportif (crampes nocturnes, troubles du sommeil et fatigue). Le sodium est présent dans tous les liquides extracellulaires, ses carences sont momentanées lors d'efforts longs et intenses, c'est pour cela qu'il est nécessaire d'ajouter du NaCl dans la boisson. Le potassium et le principal minéral intracellulaire, il permet la transmission de l'influx nerveux et la contraction musculaire, son apport est en grandes quantité par les fruits secs, les jus de fruits, les bananes et les oléagineux et il n'y pas de carence chez le sportif.
- Les oligo-élements sont apportés par l'alimentation. Le fer participe à la composition de l'hémoglobine, sa carence est très fréquente chez le sportif et affecte ses performances physiques. Le zinc est stocké au niveau des muscles et est important dans le métabolisme énergétique, ses carences chez les sportifs est récurrente. Le cuivre est un cofacteur dans la respiration cellulaire, ses carences sont fréquentes chez les sportifs. Le sélénium est un antioxydant de l'organisme et ses risques de carences sont faibles chez le sportif. Le manganèse est un cofacteur enzymatique et ses carences sont

fréquentes. Le chrome potentialise es effets de l'insuline et la synthèse du glycogène et ses carences sont possibles lors d'efforts intensifs.

- Les fibres ont un rôle structural dans les plantes. Elles ne sont pas digérées par l'organisme mais subissent un phénomène de fermentation par les bactéries de la flore intestinale et favorisent le transit intestinal. Elles ralentissent la digestion des glucides et leur assimilation, elles diminuent la glycémie postprandiale et la sécrétion d'insuline consécutive à un repas, elles diminuent la cholestérolémie, piègent des substances toxiques dont les produits cancérigènes dans l'intestin et augmentent la sensation de satiété au cours d'un repas. Elles sont essentielles à un bon équilibre intestinal chez le sportif, cependant il faut diminuer les apports les jours qui précèdent une compétition pour limiter les troubles digestifs.

Les sports d'endurances comme l'ultra-trail nécessites une grande mobilisation des stocks de glycogène et ont des risques de carence en micronutriments. Les apports recommandés sont :

- Glucide : 5-11 g/kg/j
- Protéines : 1,2 à 1,7 g/kg/j. La protéosynthèse est diminuée pendant l'effort et il y a une dégradation importante si les apports glucidiques sont insuffisants et pour les efforts supérieurs à 2h.
- Lipides : 0,8 à 1 g/kg/j dont 1/3 d'acide gras saturés, 1/3 d'acide gras poly-insaturés et 1/3 d'acides gras mono-insaturés. Ils sont le carburant des efforts de longues durées. Il est important d'augmenter la ration de lipides avant une épreuves d'endurance longues (l'ultra-trail par exemple)
- Micronutriment : leur perte est importante dans les efforts de longues durées. Cette perte d'électrolytes doit être compensé après l'effort avec une alimentation variées et riche en fruits et légumes.

De plus, il ne faut pas sous-estimer les besoins en eau et en minéraux perdus par la sueur.

La ration journalière d'un individu sédentaire est de15% de protéines, 40-45% de glucides et 35-40% de lipides. Pour un individu qui pratique un sport d'endurance les besoins glucidiques sont augmentés avec des glucides à 60-70%, lipides 15-25% et protéines à 15%. Les glucides à fort index glycémiques sont consommés plutôt avant, pendant et immédiatement après les entrainements. Les glucides à index glycémiques faibles sont consommés à distance des entrainements. Il est conseillé d'introduire des protéines animales le matin et dans la ration de récupération pour favoriser la récupération musculaire lors d'entrainements intensifs.

L'alimentation est constituée de trois grandes étapes : l'alimentation avant, pendant et après l'épreuve.

L'alimentation avant l'épreuve se divise en trois catégories : l'alimentation une semaine avant, le jour avant l'épreuve et quelques heures avant.

A J–7 une alimentation normoprotéique, hypolipidique et légèrement hyperglucidique est conseillée.

Les 3 derniers jours de la semaine précédant l'épreuve, l'objectif nutritionnel est d'augmenter voire doubler les stocks de glycogène musculaire.
Donc à J-3 les rations sont composés de 15 à 20 % de protéines ; 10 à 15 % de lipides ; 70% de glucides et 2 litres d'eau.

Il existe aussi un autre type d'alimentation lors de la semaine pré-compétition : le régime dissocié scandinave. Il est divisé en trois phases :

- A J-7, la première phase consiste à faire un effort éprouvant et intense afin de pouvoir épuiser en partie le stock de glycogène.
- De J-6 à J-4, l'apport glucidique doit être fortement diminué (à 20% de l'apport total au maximum, contrairement aux 55% recommandés) afin de prédisposer le corps au besoin et de terminer la mise à sec du stock de glycogène.
- De J-3 à J-1, l'alimentation doit se composer majoritairement de glucides de 70 à 75% dans le but de reconstituer les stocks de glycogène à un niveau plus haut qu'auparavant. Il faut limiter les « calories inutiles » pour respecter le poids de formes et de pas déséquilibrer l'apport énergétique. Les apports en protéines sont normaux.

Au final, ces deux manières se retrouvent, avec un fort taux d'apport en glucide à J-3.

La veille d'une courses les règles de bases sont de ne sauter aucuns repas, s'hydrater régulièrement tout au long de la journée et avoir un repas facile à digérer, testé auparavant, équilibré et axé sur les sucres lents pour stocker les réserves d'énergies.

Pour l'alimentation quelques heures avant, il s'agit du dernier repas avant le départ d'une course, il est donc très important et doit se faire 3-4 heures avant le départ, ni plus ni moins, sinon si le repas est pris trop longtemps avant le départ, l'estomac a déjà eu le temps de digérer et donc le corps considère cela comme être à jeun, ou alors si le repas est pris trop tard l'estomac débute à peine la digestion et est encore trop plein pour bien démarrer la course. Le repas doit comprendre entre 600 et 1000 kilocalories et doit être riche en glucides et protéines. Il est aussi important de beaucoup s'hydrater. Juste avant le début de la course, il faut se réhydrater en buvant une boisson énergétique légèrement sucrée.

Pour l'hydratation juste avant l'effort, l'hyper hydratation permet d'anticiper les pertes hydriques. Il faut apporter en même temps la boisson l'énergie et l'eau dans une « boisson d'attente » qui prépare de façon optimale le corps à l'effort. Par exemple : eau + 30g/l fructose ou eau + jus de fruit ou eau + miel (30g/l) ou 20 g de miel + une cuillère à soupe de Maltodextrine + 2 jus de citron + 500 ml de d'eau à repartir sur 1 heures par petites gorgées. (41)

Pendant la course il est nécessaire de s'alimenter pour les effort supérieurs à 1h, des aliments riches en glucides simples comme par exemple des fruits secs, pâtes de fruits, barres de céréales et au-delà de 3 à 5h d'efforts il faut y rajouter des protéines comme du jambons, poulet, fromage, barres énergétiques hyper protéinés… Régulièrement s'hydrater est important et selon la règle de base il faut boire un litre d'eau par heure pour un litre de sueur, c'est-à-dire compenser ses pertes d'eau en buvant. Idéalement, il est recommandé de boire toutes les 10-15 minutes même si le coureur ne ressent pas la soif. Afin de se réhydrater, il existe des boissons énergétiques spéciales pour les efforts de longues durées qui sont particulièrement efficaces. Ces boissons sont faites de manière à être facilement ingérées et rapidement digérées pour éviter les troubles gastro-intestinaux pendant la course. Bien qu'il faille beaucoup et régulièrement s'hydrater, le coureur se retrouve rapidement ballonné s'il boit trop vite ou trop d'eau d'un coup. Ce qui fait qu'il ne boit pas 1 litre par heure comme l'idéal le voudrait, mais en général seulement 500 millilitres. En pleine course les coureurs ne boivent que lorsqu'ils en ressentent le besoin, alors qu'en réalité ils sont déjà en phase de déshydratation. Pour pallier à cela, il est possible de mettre un peu de sel dans sa bouteille d'eau pour accentuer la sensation de soif, réhydrater rapidement les cellules du corps, compenser les pertes de sels minéraux liées à la transpiration et accélérer la digestion. Il est aussi important de se réapprovisionner en énergie, en glucides, c'est pourquoi il existe des gels énergétiques. Certains coureurs programment des rappels et parviennent à atteindre cet idéal du litre par heure. Il est important de boire après avoir absorbé ces gels pour éviter des troubles digestifs. Ces gels peuvent apporter jusqu'à 30 grammes de glucides. De manière générale, il est conseillé d'avoir une alimentation légèrement salée et solide pendant la course. Il est aussi possible de mettre une certaine quantité de glucose, selon le poids du coureur, dans son eau pour se réhydrater et en même temps apporter de l'énergie (des glucides au corps).

Certains coureurs utilisent des boissons de l'effort pour apporter en même temps l'énergie, l'eau et les sels minéraux. Pour les efforts de moins de 1h de l'eau seulement est suffisant. Pour les efforts supérieurs à 1h il est intéressant de rajouter des glucides (30 à 60 g/h) sous forme de glucose, fructose, maltose et maltodextrines et pour les efforts supérieurs à 3h mélanger des glucide, sels et protéines.

Une boissons « maison » ressemble à : jus de fruit dilué au 1⁄2 dans l'eau +/- NaCl, 25-40g/l sucre ou jus de fruit dilué au 1⁄2 + 30-40g/l Maltodextrine + une pincée de sel.

Exemple de boisson pour une course de 1h à 1h30

Boisson n°1	**Boisson n°2**	**Boisson n°3**
- 1 litre de thé vert (attention effet diurétique) ou eau minérale (hépar par exemple) ; - 1 cuillère à soupe de jus de citron ; - 20g (temps très chaud) à 70g (temps froid) de miel d'acacia. Le miel d'acacia est à privilégier car il contient plus de fructose que les autres miels ; - une pincé de sel (environ 1,2g).	- 1 volume de jus d'orange pressée ; - 3 volumes d'eau minérale ; - 4½ cuillères à café de miel ; - une pincé de sel (environ 1,2g).	Le jus de raisin dilué → des atouts majeurs pour le sportif car il garantit une qualité des sucres qui se rapproche le plus des recommandations (50 à 75% de glucose et 25 à 50% de fructose ou saccharose). Il est également une source naturelle de vitamines C et B6. Repère de dilution pour une température ambiante > 20°C : Pour préparer 1l de boisson à 20 g de glucides/l : - 150 ml de jus de raisin ; - 850 ml d'eau minérale ; - une pincé de sel (environ 1,2g). Repère de dilution pour une température ambiante < 10°C : Pour préparer 1l de boisson à 60 g de glucides/l : - 400 ml de jus de raisin ; - 600 ml d'eau minérale ; - une pincé de sel (environ 1,2g).

Exemple de boisson pour une course supérieure à 2h

Boisson n°1	**Boisson n°2**	**Boisson n°3**	**Boisson n°4**
- 1 litre de thé vert (attention effet diurétique) ou eau minérale (hépar par exemple) ; - 50g de maltodextrines ; - 30g sucre en poudre (saccharose) ; - une pincé de sel (environ 1,2g).	- 1 litre de thé vert (attention effet diurétique) ou eau minérale (hépar par exemple) ; - 50g maltodextrines ; - 30g fructose ; - une pincé de sel (environ 1,2g).	- 1 litre de thé vert (attention effet diurétique) ou eau minérale (hépar par exemple) ; - 50g maltodextrines ; - 15g fructose ; - 15g sucre en poudre (saccharose) ; - une pincé de sel (environ 1,2g).	- 1 litre d'eau minérale ; - 65g de maltodextrines ; - 15g de fructose ; - une pincé de sel (environ 1,2g). *Boisson utilisée très souvent par les ultra-marathoniens. Ils remplacent l'eau minérale par de l'eau bicarbonatée (St Yorre) préalablement dégazéifiée. Le goût est moyen mais apparemment efficace.*

Une boisson commercialisée est un ensemble de glucides, protéines, sels généralement trop hypertoniques. Il faut comparer les teneurs en glucides avec les valeurs recommandées et le gout est souvent trop prononcés pour des efforts très longs.

Les recommandations sont :

- Glucides : 30 g pour 500 ml (base de 250 ml toutes les 30 minutes)
- Sodium : 300 mg pour 500 ml
- Potassium : 300 mg pour 500 ml
- Magnésium : 56 mg pour 500 ml
- Au moins 2 vitamines du groupe B différentes.
- Antioxydants : vitamines C 12 mg, E 1.8 mg et/ou zinc 2.5 mg pour 500 ml
- Acides aminés ramifiés (BCAAs) : 1 g pour 500 ml

Lorsque la course est terminée, il est important de tout de suite se réhydrater avec de l'eau minéralisé bicarbonaté, jus de fruits dilué dans de l'eau, ou boisson énergétique, mais aussi d'absorber des glucides pour refaire le plein d'énergie. Le repas après la course doit être riche en protéines, car elles permettent aux muscles de régénérer leurs cellules, donc de mieux récupérer. Il doit aussi être riche en sels et en potassium pour faciliter la réhydratation des cellules. Mais ce type d'alimentation est souvent négligée. Car après tout, au niveau social et mental, ce moment est attendu depuis des mois.

Pour des ultra-trail composés de plusieurs étapes, la semaine avant la course peut être sous le même format. Cependant, encore une fois, pour l'alimentation pendant l'épreuve il faut s'adapter aux conditions du pays. Selon la durée de la course, avoir dans son sac la quantité quotidienne de gel et boisson énergétique n'est pas évident. Il faut donc s'adapter et créer ses ravitaillements avec ce qui est disponible tout au long des étapes (sneakers, biscuits, coca-cola, fruits sec, poulets, œufs, pates…). Après chaque étape il est aussi important de bien se réhydrater et refaire le stock d'énergie en absorbant des glucides et protéines pour les muscles. Les repas entre les étapes eux permettront de de refaire le stock de glycogène et d'énergie pour le lendemain en absorbant des sucres lents et ainsi de suite. Selon le pays, par exemple l'AMT 2018 se déroulant au Népal, il est important de ne pas prendre trop de risques alimentaires entres chaque étape durant la course. Il est conseillé de rester simple en mangeant du riz, œuf, noddles soupe (permet de s'hydrater et refaire le stock de glucide), penser à bien traiter son eau et respecter le délai d'action des comprimés Micropur® par exemple qui est de 30minutes ou avec une gourde filtrante. Les troubles digestifs peuvent vite arriver, le système digestif des occidentaux n'étant pas habituer aux bactéries du pays.

6. Enquête

6.1. Recueil des données

Pour illustrer comment aborder et gérer un ultra-trail qui se déroule en altitude, l'Annapurna Mandala Trail qui s'est déroulé au Népal en 2018 a été utilisé comme support d'analyses. Comme elle a été décrite précédemment, cette course fut composée de 300 kilomètres (+/- 15.000 m) à parcourir en 11 étapes et de 23 concurrents de différentes nationalités, français, suisse, népalais et réunionnais dont 8 marcheurs et 15 coureurs. Le parcours était le même pour les marcheurs et les coureurs, cependant, les étapes de 42km ou plus pour les coureurs étaient raccourcis pour les marcheurs par l'utilisation de voiture 4x4 pour leur réduire la distance. Il y a eu donc 2 classements, un pour les coureurs et un pour les marcheurs.

Les données furent récoltées à l'aide d'un questionnaire (Annexe) rédigée sur le logiciel OpenOfficice® sous format papier, donné à la fin de la course en français et en anglais pour les Népalais après explication concernant le caractère facultatif de l'enquête.

Le questionnaire a été divisé en 6 parties :

- Caractéristiques morphologiques générale du coureur et renseignement médicale
- Expérience sportive et préparation des coureurs
- Équipement
- Autoévaluation de leur alimentation
- Habitudes médicamenteuses avant, pendant et après la course
- Leur ressentie après la course

L'anonymisation du questionnaire était laissée au choix du coureur. Un espace libre était laissé à disposition pour d'éventuelle remarque et j'étais bien évidemment présente pour répondre à leurs questions pour répondre de manière plus précise possible notamment pour les Népalais pour qui certaines questions étaient plus difficiles.

Afin de limiter la perte de données, la plupart des questions concernant les données morphologiques générales, l'équipement, l'expérience sportive, l'entraînement et la préparation physique étaient des questions ouvertes. Les questions d'ordre médical ainsi que les questions concernant l'alimentation entaient essentiellement des questions à choix multiple.

6.2. Analyse statistique

Les questions ont été intégrés à un tableur Excel® (Microsoft®). Les paramètres recueillis lors de l'étude ont été analysés pour leur impact sur le classement à l'arrivée. Le lien entre le classement et une variable quantitative a été étudié par test de Wilcoxon-Mann-Whitney. Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney est un test statistique non paramétrique bilatéral qui permet de tester l'hypothèse selon laquelle les médianes de chacun de deux groupes de données sont proches. Donc nos hypothèses sont : H0 : le rang de classement est identique entre les 2 échantillons, H1 : le rang de classement est différent. Dans ce modèle, nous considérons la différence comme statistiquement significative lorsque la valeur-p était inferieure à 0,05.

6.3. Résultats

Description des participants.

Pour cette AMT 2018 il y a eu 23 participants dont 8 marcheurs et 15 coureurs. 19 questionnaires sur les 21 participants ont été recueillis (certains sont partis rapidement sur le trajet retour (des népalais surtout, difficilement joignable)). Parmi cette population il y avait 9 coureurs hommes et 2 coureuses filles puis 3 marcheurs hommes et 6 marcheuses filles. Les filles sont donc bien minoritaires sur ce type d'épreuves en course mais ici majoritaires en marche. De plus, parmi les coureurs il y avait 6 coureurs appartenant à la catégorie des seniors (23 à 39 ans), 2 coureurs népalais juniors (21 et 22 ans) et 3 coureurs Master 2 (50 à 59 ans). Pour les marcheurs il y avait 4 marcheurs de la catégorie Master 3 (à partir de 60 ans), 2 marcheurs sénior et 2 marcheurs Master 2. Il n'y a pas eu d'abandon sur cette course.

Catégorie	Nombre de coureurs	Nombre de marcheurs
Junior 21-22 ans	2	
Senior 23-39 ans	6	2
Master 1 40-49 ans	0	
Master 2 50-59 ans	3	2
Master 3 60 ans et plus		4

Bilan des ultra-trailers et marcheurs par les médecins.

Les participants ont été interrogés sur leur historique médicale :

	Oui	Non	Oui (%)
Bilan sanguin	14	5	73,68
EFR	4	15	21,05
Test VMA	10	11	52,63
ECG	9	10	47,37
Test d'effort	10	9	52,63
Consultation d'un cardiologue	9	10	47,37
Consultation d'un médecin du sport	7	12	36,84
Test d'hypoxie	5	14	26,32
Prise de tension artérielle	11	8	57,89

EFR : exploration fonctionnelle respiratoire

VMA : vitesse maximale aérobie. C'est la vitesse à partir de laquelle la consommation d'oxygène est maximal ou vitesse VO2 max.

Test d'hypoxie : Ce test d'effort en hypoxie consiste en cinq phases : repos en normoxie (RN), repos en hypoxie (RH) (grâce à une fraction d'oxygène inspiré à 11.5%), exercice en hypoxie (EH) et exercice en normoxie (EN). La cinquième et dernière phase est une phase d'exercice en normoxie d'intensité croissante de manière à ce que la fréquence cardiaque atteigne sa valeur lors de la phase d'exercice en hypoxie (EN+). Les changements de phases sont réalisés une fois l'obtention d'un palier stable des valeurs, aux alentours de quatre minutes. L'exercice est constant, similaire entre les deux phases et fixé à 30% de la puissance maximale aérobie de normoxie de l'individu estimée grâce à la fréquence cardiaque maximale théorique. Le test évalue la saturation en oxygène, la fréquence cardiaque et le débit ventilatoire. De cette manière, on procède à l'analyse de la désaturation et de la réponse cardio-ventilatoire du sujet en situation d'hypoxie, au repos et à l'exercice, comparativement à une situation en normoxie.

En ce qui concerne leur consommation d'alcool elle est occasionnelle (moins de 1 verre d'alcool par semaine en moyenne) pour 89,47% des participants et négative pour les 10,53% restant du groupe. Pour les fumeurs, il n'y en avait aucun.

Une analyse statistique est réalisée pour l'ECG, le test d'effort, le test VMA et le test hypoxique en fonction du classement afin d'évaluer l'impact de ces paramètres sur le classement d'arrivée.

Le test VMA est une des valeurs fondamentales à connaître. En particulier lorsqu'on veut faire de l'entraînement fractionné avec précision. En effet, c'est cette valeur de VMA qui permet de définir à quelle allure il faut s'entraîner pour faire progresser telle ou telle qualité physiologique. Plus on court vite, plus on consomme de l'oxygène jusqu'à ce qu'on atteigne sa capacité maximale. Cette VO2max se travaille et peut être améliorée.

Les tests d'efforts sont réalisés dans le but de diagnostiquer d'une maladie coronarienne et/ou de définir les modalités d'un entraînement de haut niveau ou d'un réentrainement. Ce test doit être associé à un test d'effort en hypoxie pour un séjour sportif en altitude.

Les tests en hypoxie ont donc été élaborés dans le but d'évaluer les adaptations physiologiques de l'organisme soumis à un manque d'oxygène constant suite à une baisse de la pression atmosphérique et de la densité de l'air en altitude. Ce test est réalisé chez les personnes qui n'ont aucun historique de séjour en altitude au-delà de 3000 mètres ou pour les personnes qui ont subi une ou des pathologies liées à l'altitude : MAM, Œdème cérébrale ou Pulmonaire. La course passant par le Larke Pass à 5106m d'altitude, ce test est important.

L'exposition à l'hypoxie s'accompagne d'une augmentation initiale du débit cardiaque par accélération de la fréquence cardiaque, et d'une augmentation du débit ventilatoire (accélération de la fréquence respiratoire). Ces réactions entraînent une surcharge de travail pour l'appareil ventilatoire et pour le cœur. C'est pourquoi l'ECG est un examen intéressant à faire avant un ultra-trail en altitude.

	Oui VMA	Non VMA
Classement	1	2
	4	3
	5	7
	6	8
	9	10
	1	11
	2	6
	3	7
	4	8
	5	
Test Mann-Whitney	p-value 0,03	

Non VMA : les personnes n'ayant pas fait le test VMA. Oui VMA : les personnes ayant fait le test VMA. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur $p = 0,03$ est inférieure à 0,05 et donc significative. On peut alors dire que le paramètre étudié à de l'impact sur les deux échantillons. Les personnes les mieux classées connaissent leur VMA. La connaissance de cette VMA permet d'adapter son entrainement pour préparer la course à venir, notamment le fractionné pour améliorer sa fréquence cardio respiratoire en montée, particulièrement sur cette course où l'altitude grimpe jusqu'à 5106m.

	Oui test hypoxie	Non test hypoxie
Classement	5	1
	6	2
	2	3
	7	4
	8	7
		8
		9
		10
		1
		3
		4
		5
		6
		11
Test Mann-Whitney	p-value 0,78	

Non test hypoxie : les personnes n'ayant pas fait le test hypoxique. Oui test hypoxie : les personnes ayant fait le test hypoxique. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,78 est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n'aurait donc pas d'impact sur les deux échantillons. Cependant, dans le classement on peut voir que le deuxième et troisième coureur sont des népalais et n'ont pas besoin ni les moyens de faire ce test d'hypoxie. Le premier coureur au classement est un coureur professionnel suisse qui passe son année à grimper été/hiver des hauts sommets. Les autres coureurs ont tous un historique de hautes altitudes. Les personnes ayant fait le test hypoxique sont les personnes n'ayant aucuns historiques en hautes montagne et/ou vivants dans des régions peu vallonnées. Pour ces personnes le test était obligatoire et nécessaire pour participer à la course.

	Oui ECG	Non ECG
Classement	1	3
	2	4
	5	7
	6	8
	2	9
	3	10
	4	11
	5	1
	7	6
	8	
Test Mann-Whitney	p-value 0,13	

Non ECG : les personnes n'ayant pas fait l'ECG. Oui ECG : les personnes ayant fait l'ECG. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

Un électrocardiogramme (ECG) est un test qui étudie le fonctionnement du cœur en mesurant son activité électrique. À chaque battement cardiaque, une impulsion électrique (ou « onde ») traverse le cœur. Cette onde fait contracter le muscle cardiaque afin qu'il expulse le sang du cœur. Un ECG mesure et enregistre l'activité électrique qui traverse le cœur. Un médecin peut déterminer si l'activité électrique ainsi observée est normale ou irrégulière.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,13 est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n'aurait donc pas d'impact sur les deux échantillons. Il n'y aurait donc aucun lien entre le classement et les personnes ayant fait un test ECG ou non. Parmi les coureurs et les marcheurs il y a 8 seniors et 2 juniors, ces personnes sont encore jeunes et se considèrent sportives et en bonne santé, le risque de développer des maladies cardio-vasculaire est donc moindre. Quant aux masters, ils ont tous déjà fait un ECG. Cela ne dépendrait donc pas du classement mais plutôt de l'âge des participants.

	Oui test d'effort	Non test d'effort
Classement	1	3
	2	4
	5	7
	6	8
	1	9
	2	10
	3	11
	4	6
	5	7
		8
Test Mann-Whitney	p-value 0,0031	

Non test d'effort : les personnes n'ayant pas fait le test d'effort. Oui test d'effort : les personnes ayant fait le test d'effort. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

Le test d'effort : c'est un examen consistant à l'enregistrement d'un ECG durant le déroulement d'un exercice physique calibré

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,0031 est inférieur à 0,05 et donc significative. Le paramètre étudié aurait donc un impact sur les deux échantillons. On peut alors observer que les personnes les mieux classées ont fait ce test d'effort. Le test d'effort permet le diagnostic d'une maladie coronarienne s'il y en a

une. Ce test va définir les modalités d'un entraînement de haut niveau ou d'un réentrainement. Il peut être aidé par la mesure de l'évolution de la consommation maximale d'oxygène durant l'entraînement. Pour un séjour en altitude, ce test doit être associé au test d'effort en hypoxie vu précédemment.

Préparation sportive pour un effort ultra-endurant en altitude

Une analyse statistique est réalisée pour le nombre moyen d'année de pratique de la course à pied, la plus haute altitude atteinte avant l'AMT, le volume hebdomadaire moyen au cours des derniers mois en heures et dénivelé en fonction du classement.

	inf. 12 années	Égal/sup 12 années
Classement	2	1
	3	4
	5	6
	7	8
	9	10
	11	1
	5	2
	6	3
	7	4
		8
Test Mann-Whitney	p-value 0,32	

Inf. 12 années : les personnes qui ont moins de 12 années de pratique de la course à pied. Égal/sup 12 années : les personnes ayant 12 années ou plus de pratiques de la course à pied. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,32 est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n'aurait donc pas d'impact sur les deux échantillons. Il n'y aurait pas de lien entre le nombre d'années de pratiques et le classement. En effet, parmi les premiers coureurs, le deuxième et le troisième sont des népalais de la catégorie junior avec peu d'expérience.

	inf. 3000m	Égal/sup 3000m	% égal/sup 3000m
Classement	3	1	83,33
	7	2	
	7	4	
	8	5	
		6	
		8	
		9	
		10	
		11	
		1	
		2	
		3	
		4	
		5	
		6	
Test Mann-Whitney	p-value 0,45		

Inf. 3000m : les personnes qui ne sont jamais allées au-delà de 3000 mètres d'altitude. Égal/sup 3000m : les personnes qui sont allées à 3000 mètres ou plus d'altitude. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,45 est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n'aurait donc pas d'impact sur les deux échantillons. On pourrait dire qu'il n'y a pas de lien entre l'altitude déjà atteinte et le classement. Cependant, quand on observe le pourcentage de personnes ayant déjà été au-delà de 3000 mètres d'altitude qui est déjà au-dessus de la limite « basse » / « haute » de 2500 mètres, il est de 83%. Ce genre de course demande un historique de séjour en haute altitude ou un test d'effort hypoxique si ça n'est pas le cas (qui a été réalisé) afin d'éviter les problèmes médicaux associés à l''altitude.

	inf. 10h	Égal/sup 10h
Classement	5	1
	6	2
	10	3
	11	4
	3	8
	5	1
	6	2
		4
		8
Test Mann-Whitney	p-value 0,04	

Inf. 10h : les personnes qui ont moins de 10h d'entrainement hebdomadaire durant les derniers mois précèdent la course. Égal/sup 10h : les personnes qui ont 10h ou plus d'entrainement hebdomadaire durant les derniers mois précèdent la course. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,04 est inférieur à 0,05 et donc significative. Le paramètre étudié aurait donc un impact sur les deux échantillons. Il y a un lien entre le volume d'heure hebdomadaire durant les derniers mois précèdent la course et le classement. Plus le participant a effectué un grand nombre d'heures durant son entrainement, mieux il est classé. En effet, cette course est composée d'étapes à plus de 42 kilomètres pour les coureurs, il faut donc un entrainement approprié qui demande beaucoup d'heures. Pour les marcheurs, le rythme étant plus lent, plus il y a de kilomètres à l'entrainement, plus le temps se rallonge aussi. L'analyse du volume horaire hebdomadaire à l'entrainement semble alors plus pertinent que le volume kilométrique pour ces 2 classements. Donc, le fait que les marcheurs ne fassent pas les étapes de 42km qui étaient réduites à maximum 30kilomètres par une partie en voiture 4x4, ne crée pas de biais. De plus, le nombre d'heures d'entrainement ne compose pas uniquement la course à pied mais peut être aussi du vélo, ski, natation, renforcement musculaire…

	inf. 900m	Égal/sup 900m
Classement	6	1
	9	2
	10	3
	11	4
	5	5
	6	8
	8	1
		4
Test Mann-Whitney	P-value 0,006	

Inf. 900m : les personnes qui réalisaient moins de 900 mètres de dénivelé hebdomadaire durant les derniers mois précèdent la course. Égal/sup 900m : les personnes qui réalisaient 900 mètres ou plus de dénivelé hebdomadaire durant les derniers mois précèdent la course. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,006 est inférieur à 0,05 et donc significative. Le paramètre étudié aurait donc un impact sur les deux échantillons. Il y a un lien entre le dénivelé hebdomadaire réalisé durant les derniers mois précèdent la course et le classement. En effet, cette course est composée d'étapes à plus de 2000 mètres de dénivelé positif et/négatif. Pour sa préparation il est nécessaire d'en faire pendant l'entrainement. Cependant, certaines régions s'y prêtent plus que d'autres. Par exemple, le premier coureur

est suisse et vit à la Fouly et les deuxième et troisième sont népalais, leur environnement leur permet de faire plus de dénivelé à l'entrainement que quelqu'un qui vie en Bretagne.

Consommation médicamenteuse des ultra-trailers.

Les participants ont été interrogés sur leur consommation médicamenteuse pendant la course :

	Oui	Non	% oui
Classement	1	4	73,68
	2	6	
	3	7	
	5	6	
	8	8	
	9		
	10		
	11		
	1		
	2		
	3		
	4		
	5		
	7		
Test Mann-Whitney	p-value 0,4		

Oui : la personne a consommé au moins 1 médicament durant la course. Non : la personne n'a utilisé aucun médicament durant la course. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur $p = 0,4$ est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n'aurait donc pas d'impact sur les deux échantillons. Il n'y aurait pas de lien entre la consommation de médicaments et le classement. Cependant, en calculant le pourcentage on observe que 73,68% des participants ont pris au moins une fois un médicament, ce qui concerne un grand nombre de coureurs et marcheurs.

Pour en savoir d'avantage, le détail des médicaments les plus utilisés pour la douleur et le mal des montagnes est analysé.

	Nombre de personne ayant consommé ces médicaments	%
Paracétamol	6	31,58
Aspirine	0	0,00
AINS	5	26,32
Beta 2 mimétiques / antihistaminiques	0	0,00
Antiémétiques	4	21,05
Anti diarrhéique	5	26,32
Somnifère	1	5,26
Corticoïde	1	5,26
Diamox	0	0
Nifédipine	0	0
Tadalafil/sildénafil	0	0

Les médicaments les plus utilisés ont donc été le paracétamol, les AINS, antiémétiques, antidiarrhéique, et une personne a utilisé un somnifère et corticoïde.

En ce qui concerne le somnifère, la personne ayant utilisé du Stilnox a une mauvaise qualité de sommeil quotidien. Cela n'a pas de rapport avec le séjour en altitude ou la course.

En ce qui concerne la prise de corticoïde, qui est considéré comme produit dopant, la personne avait une très grosse toux qui s'est transformée en bronchite. Elle a aussi consommé du Dafalgan® codéiné le soir pendant quelques nuits comme antitussif.

D'après ces résultats il est déjà observable que aucuns des participants n'a souffert d'un MAM sévère par la prise de diamox, béta 2 mimétique etc qui est de zéro.

Cependant, il est intéressant d'analysé statistiquement si la prise de paracétamol, AINS, antiémétiques ou anti diarrhéique, les médicaments les plus utilisés ont un lien avec le classement.

Paracétamol	Oui	Non
Classement	1	4
	2	6
	3	7
	5	8
	11	9
	4	10
		1
		2
		3
		5
		6
		7
		8
Test Mann-Whitney	p-value 0,25	

Oui : la personne a consommé du paracétamol durant la course. Non : la personne n'a pas utilisé du paracétamol durant la course. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,4 est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n'aurait donc pas d'impact sur les deux échantillons. Il n'y aurait pas de lien entre la consommation de paracétamol et le classement.

AINS	Oui	Non
Classement	8	1
	9	2
	10	3
	11	4
	2	5
		6
		7
		1
		3
		4
		5
		6
		7
		8
Test Mann-Whitney	p-value 0,03	

Oui : la personne a consommé des AINS durant la course. Non : la personne n'a pas utilisé d'AINS durant la course. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,03 est supérieur à 0,05 et donc significative. Le paramètre étudié aurait un d'impact sur les deux échantillons. Il y aurait un lien entre la consommation d'AINS et le classement.

Contrairement au paracétamol qui a été utilisé en cas de maux de tête et fièvre, les AINS ont été utilisé surtout pour des douleurs articulaires et aussi les maux de tête associé ou non au paracétamol selon l'intensité. Ce qui nous laisse pensé que les premiers coureurs qui n'en ont pas consommé étaient peut-être mieux préparé et ont moins souffert du nombre conséquent de kilomètres parcourus. En effet, les articulations qui ne sont pas habitués à subir autant d'effort quotidien sont souffrantes. Pour contrer cela l'utilisation d'AINS est possible et recommandé durant une courte période. De plus, 4 participants ont eu droit à de la mésothérapie : injection locale de profénid et lidocaine au niveau du genou dû à des vieille blessure lié à la pratique de la course et une cheville à cause d'une entorse lors de la course.

Ce genre de course n'est donc pas sans conséquences provisoire ou non pour les moins préparés.

Antiémétiques/anti diarrhéique	Oui	Non
Classement	2	1
	5	3
	11	4
	3	6
	7	7
		8
		9
		10
		1
		2
		4
		5
		6
		8
Test Mann-Whitney	p-value 0,96	

Oui : la personne a consommé des antiémétiques/anti diarrhéique durant la course. Non : la personne n'a pas utilisé d'antiémétiques/anti diarrhéique durant la course. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents. Les personnes ayant pris des antiémétiques ont aussi consommé des antis diarrhéiques c'est pourquoi ils ont été associés.

D’après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,96 est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n’aurait donc pas d’impact sur les deux échantillons. Il n’y aurait pas de lien entre la consommation d’antiémétiques/anti diarrhéique et le classement. Les symptômes ont rarement duré plus d’une journée.

Après avoir analysé la prise de médicaments il est intéressant de savoir s’ils ont été consommés à cause des effets de l’altitude ou non. C’est pourquoi il a été fait une analyse statique des 2 cas de figures possible parmi les personnes ayant pris des médicaments : si les symptômes sont associés à l’altitude ou si les symptômes ne sont pas associés à l’altitude.

Symptômes associés à l'altitude	Oui	Non	% Oui
Classement	4	1	35,71
	9	2	
	11	3	
	2	5	
	7	8	
		10	
		1	
		3	
		5	
Test Mann-Whitney	p-value 0,2		

Oui : la personne a eu des symptômes associés à l’altitude pendant la course. Non : la personne n’a pas eu de symptômes associés à l’altitude pendant la course. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D’après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,2 est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n’aurait donc pas d’impact sur les deux échantillons. Il n’y a pas de lien entre les symptômes associés à l’altitude et le classement. Les symptômes principaux étant maux de tête, fatigue, nausée, perte d’appétit et œdème mais faible.

Symptômes non associés à l'altitude	Oui	Non	%oui
Classement	1	2	57,14
	5	3	
	9	8	
	10	2	
	11	4	
	1	5	
	3		
	7		
Test Mann-Whitney	p-value 0,47		

Oui : la personne a eu des symptômes non associés à l'altitude pendant la course. Non : la personne n'a pas eu de symptômes non associés à l'altitude pendant la course. Les coureurs et les marcheurs ont été rassemblé car il y a 2 classements différents.

D'après le test de Mann-Whitney, la valeur p = 0,47 est supérieur à 0,05 et donc non significative. Le paramètre étudié n'aurait donc pas d'impact sur les deux échantillons. Il n'y a pas de lien entre les symptômes non associés à l'altitude et le classement. Les principaux symptômes étaient une toux, fièvre, diarrhée.

Certains participants avaient des symptômes associés et non associés à l'altitude.

CONCLUSION

La mise en avant actuelle d'un mode de vie sain et la culture du dépassement de soi amènent à une explosion des disciplines d'ultra-endurance. Les connaissances dans ce domaine restent peu importantes et cette enquête apporte une pierre à l'édifice.

Sur l'importance de l'entrainement, d'après l'enquête, les participants les mieux classés semblent les mieux entrainés. Par exemple, par la connaissance de leur VMA afin d'affiner leurs allures et leurs séances ou leurs nombres d'heures d'entrainements et de dénivelés hebdomadaires effectués. Chez ces coureurs, le nombre d'années d'expériences ne changent pas leurs classements. Il est donc surtout important de bien réaliser et respecter son plan d'entrainement sur 12 semaines comme le conseil de nombreux coachs sportifs, en fonction de la course préparée.

Il y a des éléments plus compliqués à entrainer et préparer : les troubles digestifs liés à l'alimentation et celle disponible sur place. Cette AMT 2018, qui se déroule sur plusieurs jours et dans un pays avec des conditions d'hygiène précaire, le nombre de prise d'anti-diarrhéique et antiémétique a été présente chez 26% et 21% des participants mais il n'y a aucun lien entre le classement et la prise de ces médicaments. L'alimentation pendant une course est important afin de bien récupérer et affronter les prochaines étapes. Sans énergie il est impossible de courir. Cependant, durant ce type de course il faut s'adapter à la culture et disponibilités du pays. Certains ont payés les frais d'un système digestif occidental non habitué aux bactéries du pays, cela fait partie du jeu.

En ce qui concerne l'altitude, le plus important est de bien s'acclimater avant et pendant la course pour prévenir le Mal Aigu des Montagnes ou encore, un œdème pulmonaire ou un œdème cérébral. Pendant l'AMT 2018, la règle « ne pas monter trop vite trop haut » a bien été respecté, à partir de 3500m, entre deux nuits consécutives il y avait 300 à 500 mètres d'écart positif maximum. Il y a quand même 35% des personnes participants à l'enquête qui ont eu des symptômes bénins en lien avec l'altitude. Ces symptômes peuvent être des maux de tête (96 % des cas), fatigue excessive, des troubles importants du sommeil, des vertiges, une perte d'appétit et des nausées, vomissement, dyspnée d'effort, diminution de la diurèse, une irritabilité, asthénie, lassitude, œdèmes périphériques ou trouble neurologique. L'expérience ou non de la haute altitude chez ces sportifs n'a pas eu d'influence sur leur classement. Cependant, ici 83,33% ont déjà été à plus de 3000m d'altitude avant la course. Les coureurs et les marcheurs savaient donc déjà à quoi se préparer en venant à cette épreuve et comment aborder les étapes prévues, ça aide. Cette préparation physique et même psychologique au préalable n'est pas à négliger. Une bonne acclimatation permet de limiter de manière importante les effets de l'altitude. Or, les populations qui vivent en basse altitude, ne serons jamais assez acclimatées pour cet environnement de haute altitude qui n'est pas le leur. Les coureurs Népalais eux n'ont eu aucuns symptômes et étaient plutôt en forme lors des étapes au-dessus de 4000m comparés aux autres

coureurs. Les conséquences physiologiques de l'adaptation héréditaire des populations himalayens vivant en hautes altitudes influencent bien différents paramètres : la ventilation, la P02 et PC02, la réponse à l'02, CO2 et au pH, la quantité d'hématocrites et hémoglobines, la diffusion alvéolo- capillaire et le volume pulmonaire. C'était observable chez ces sportifs de l'AMT 2018.

L'ultra-trail en haute altitude, c'est une expérience humaine et sportive à découvrir et à partager, mais il faut le préparer.

BIBLIOGRAPHIE

(1) Association, International Trail Running, Définition du trail (internet). Disponible sur : http://www.itra.org/page/259/Definition_of_trail-running.html

(2) Baker, P.T, (1978) « The adaptative fitness of high-altitude population », in : The biologyofhigh-altitudepeoples. IBP, New-York, Cambridge University Press. Pp. 317_350

(3) ScheerV, Murray A, book : sport injurie : prevention, diagnosis, treatment and rehabilitation. Chapter : Ultra-marathon running injuries, Sport injuries, 2014, editors : Doral M., Karisson J, pp.12 Publisher : Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2014

(4) Millet G, Tomazin K, Vergès S, Vincent C, Martin V, fatigue et récupération de la fonction neuromusculaire lors d'un effort extrême : exemple d'un ultra-trail en montagne, UTMB, june 2017

(5) Blondel. R Bergzoll. S, Poleti. L, Basset. P, Duclos. M, Pathologies traumatiques et métaboliques lors d'un ultra-marathon de montagne : l'exemple de l'UTMB®, 2019

(6) M, Arnaud, L'automédication : Bilan et conseils. Thèse

(7) Patrick Basset, Marty Hoffman, Volker Scheer, ultrasportsscience, http://ultrasportsscience.us/the-foundation-home/, 2016-1017

(8) Poirier B, Les chevaliers du vent, (internet) https://www.leschevaliersduvent.fr/bruno-poirier/

(9) PELAYO, B. BARON et Pr. P., physiologie de l'exercice. Universitéde la Rénion et de Lille 2.

(10) Mienville, J-M, physiologie musculaire, UNS

(11) Di Giorgio C, (cours) Marseille, la physiologie de l'exercice

(12) JOBIN, C. (cours) les filières énergétiques.

(13) Pascal Balducci, Lepape-info, entrainement.(internet) https://www.lepape-info.com/entrainement/entrainement-running/progresser/le-test-deffort-est-il-aussi-important-en-trail-que-pour-la-route/, fevrier 2016.

(14) A. Vassy, E. Vassy, La temperature de la haute atmosphère, J. phys. Radium, 1942, 3(1), pp.8-16.10.1051.

(15) Richalet J-P, Herry J-P, Blein J-P., Médecine de l'alpinisme et des sports de montagne, Masson, 2006.

(16) Dugas, L., and D. Rivière. La pathologie liée à l'altitude. Med Trop 57bis : 427-430, 1997.

(17) Bunn, F., and R. Poyton, Oxygen sensing and molecular adaptation to hypoxia. Physiol Rev 1996. 76(3) :829-85 PMID : 8757790.

(18) Cauchy, E, Petit manuel de médecine de montagne de l'ampoule à l'oedème pulmonaire et de la randonnée à l'expé himalayenne, Glénat, 2007

(19) Richalet J-P. Modification physiologique et pathologiques en haute altitude, Paris, 2008.

(20) Yi X, Liang Y, Huerta-Sanchez E, et all., Sequencing of 50 human exomes reveals adaptation to high altitude., Jul 2010 2 ;329(5987) : 75-8. PMID : 20595611

(21) Labie D, L'adaptation aux très hautes altitudes, Inserm U567-UMR CNRS 8104, Med Sci (Paris) 2010 ; 26 : 1038-1039

(22) Percy MJ, Furlow PW, Lucas GS, et al, A gain-of-function mutation in the HIF2A gene in familial erythrocytosis, N Engl J Med, Jan 2008 ; 358 :162-8 PMID :18184961.

(23) FFME, Fédération française de la montagne et de l'escalade Commission Médicale, Le Mal Aigu des Montagnes, (internet) https://www.ffme.fr/uploads/medical/documents/mal-aigu-montagne.pdf

(24) Vanderstraeten, J, Aborder l'altitude en toute sécurité - prévention du MAM et des œdèmes d'altitude. Revue médecine générale, Juin 2011 ; (284).

(25) Kedzierewicz, R et Cabane, D, Mal aigu des montagnes et œdème cérébral de haute montagne., La Revue du Praticien., Janvier 2013 ; 22(2) : 329-55.

(26) Dorosz P, Vital Durand D, Le Jeunne C., Guide pratique des médicaments., Paris edition Maloine, 2013

(27) Beaumont M, Batéjat D, Piérard C, Van Beers P, Philippe M, Léger D, et al., Zaleplon and zolpidem objectively alleviate sleep disturbances in mountaineers at a 3,613 meter altitude. Sleep, 2007 ; 30(11) : 1527.

(28) Gallagher SA, Hackett PH, High-altitude illness. Emergency Medicine Clinics of North America., 2004 ; 22(2) : 329-55.

(29) Leaf DE, Goldfarb DS. Mechanisms of action of acetazolamide in the prophylaxis and treatment of acute mountain sickness. Journal of Applied Physiology. Décembre 2006 ; 102(4) : 1313–22.

(30) Richalet J-P, Larmignat P, Poumon et altitude, 2010, lsevier Masson. 2010 ; (6-063- 10) (internet) http://www.em-consulte.com/article/10897/poumon- et-altitude

(31) Imray C, Wright A, Subudhi A, Roach R. Acute Mountain Sickness : Pathophysiology, Prevention, and Treatment. Progress in Cardiovascular Diseases. Mai 2010 52(6) : 467–84.

(32) Sevvom V. Acute Mountain Sickness, High Altitude Cerebral Edema and High Altitude Pulmonary Edema. School of Physician Assistant Studies ; Août 2008.

(33) Pascal Balducci, Lepape-info, Plan d'entrainement 12semaines pour un ultra-trail. (Internet) https://www.lepape-info.com/entrainement/entrainement-running/plan-dentrainement-ultra-trail-sur-12-semaines/, dec 2017.

(34) Cochard, B., Plan d'entrainement 12semaines pour un ultra-trail. (Internet) https://trailpaca.fr/images/entrainement/plan-ultra.pdf

(35) Millet, Guillaume, Ultra-trail : plaisir, performance et santé, Lyon, Outdoor Editions, 2012

(36) Pascal Balducci, Lepape-info, https://www.lepape-info.com/entrainement/entrainement-running/trail-quel-renforcement-musculaire/, avril 2015

(37) Borne, R, Électrostimulation neuromusculaire et récupération à court terme : implications dans la performance du sportif de haut niveau, INSEP, thèse 2016

(38) Lacroix, E, Guide d'entraînement à l'ultra-trail, Saint-Denis, Orphie, 2009

(39) Lottillier E, Mode de vie actuel et Qualité du Sommeil : Impact sur la Santé, thèse 2018

(40) Guezennec, C-Y, 14ème Colloque National de Lutte et de Prévention du Dopage, chapitre : Intérêt de l'entraînement en altitude, https://www.franceolympique.com/files/File/actions/sante/colloques/14eme/Interet_de_l_entrainement_en_altitude.pdf, Paris, mars 2014

(41) Di Giorgio, C., (cours) Hygiène et diététique chez le sportif,

ANNEXE

Questionnaire de l'étude

Général :

Nom/prénom :
Sexe :
Nationalité :
Age :
Travail :
Lieu de vie :
Poids (en kilogrammes) :
Taille (en centimètres) :
Taux de masse grasse :

Blessures antécédentes (tendinite, traumatique, musculaire, pathologie rhumatologique, autres) :
Sont-elles dues à la pratique sportive ? Laquelle ?

Blessures actuelles (tendinite, traumatique, musculaire, pathologie rhumatologique, autres) :
Sont-elles dues à la pratique sportive ? Laquelle ?

Sports pratiqués autre que le trail ?
Antécédents familiaux médicaux ?
Antécédents chirurgicaux ?
Sommeil ?
Antécédents dépressifs ?
Bilan sanguin ?
EFR ?
Fumeur ?
Prise de médicaments chronique ? Si oui lesquels ?

Test de VMA ? ECG ? Test d'effort ? Consultation d'un cardiologue ? Médecin du sport ? Exercice d'hypoxie ? Test ? Prise de tension artériel ? aux 2 bras ? Oui/non/Date

Expériences :

Nombres moyens d'années de pratique :
Nombre de trails (< 50 km) courus lors des trois dernières années, exemples :
Nombre de trails (> 50 km) courus lors des trois dernières années, exemples :
Nombre d'abandons sur trail ?
Le/lesquels :

Si oui pourquoi ? (Blessure, un trouble gastrique, craquage mental, une pathologie en cours, un facteur extérieur, un manque de préparation: barrage horaire, hypothermie, mauvaise gestion de l'alimentation, mauvaise hydratation ,découverte du trail, fatigue, surentrainement, fringale, crampes, difficultés à ventiler correctement, autres?)

Participation à un semi-marathon, le/lesquels :
Participation à un marathon, le/lesquels :
Plus haute altitude atteinte ? Où et quand ?
Première Annapurna Mandala Trail ?
Êtes coureur ? Marcheur ?

Préparation particulière :
Seul, club, autres ?
Programmation conseillée ? Par qui (coach, médecin, internet, autres coureurs, magasine, autres) ?

Durée de préparation (en semaines) :
Volume d'entraînement hebdomadaire (en km) :
Volume hebdomadaire au cours des deux derniers mois (en heures) :
Dénivelé hebdomadaire (en mètres) :
Séance hebdomadaire la plus longue (en kilomètres) :

Matériel :

Montre technique : Model ?
L'avez-vous utilisé ?
Si oui comment ?

Drop de la semelle (en millimètres) :

Recours aux chaussettes de contention :
Bénéfices perçus aux chaussettes de contention :
-Confort :
-Réduction crampes/ courbatures :
-Récupération/ performance :
-Maintien :
-Bénéfice psychologique/ protection :

Recours aux semelles orthopédiques :
-Mode d'obtention :
-Démarche personnelle :
-Proposition du médecin :
-Blessures à répétition :
-Autres :

Alimentation

Régime particulier ? Conseillé par qui (coach, médecin, internet, autres coureurs, magasine, diététicien, autre) ?
Apports en lipides pendant la phase préparatoire :
Insuffisants : Proches : Supérieurs :
Apports en glucides pendant la phase préparatoire :
Insuffisants : Proches : Supérieurs :
Apports en protides pendant la phase préparatoire :
Insuffisants : Proches : Supérieurs :

Recours aux compléments alimentaires avant la course :
BCAA et autres compléments protéiques, Spiruline, Maltodextrine, Complexe multi-vitaminé, Gâteau du sport, Autres

Apports pendant la course :
Eau plate, Eau riche en sel, Soda, Boisson de l'effort, Soupe, Gels
Fruits secs, Riz, Poulet, Noix, Pain d'épice, Pate de fruit, Barres énergétiques, Autres

Recours à une médication ? Laquelle

Avant :

Pendant :

Après :

Type de médicaments pris par les coureurs :

Automédication ? conseillée par qui (coach, médecin, internet, autres coureurs, pharmacien magasine, autre) ?

<u>L'après course :</u>

Symptôme lié à l'altitude ? œdème, essoufflement permanent, l'épuisement, un pouls accéléré, une toux avec parfois un peu de sang, une augmentation de la température corporelle environ 38,5°, cyanose

Suiviez-vous le niveau d'altitude régulièrement pendant chaque étape ?

Suiviez-vous votre rythme cardiaque pendant l'effort et comment ?

Feriez-vous certaines choses différemment : préparation physique, alimentaire ? avant la course, pendant la course ?

SERMENT DE GALIEN

Je jure, en présence de mes maitres de la Faculté, des conseillers de l'Ordre des pharmaciens et de mes condisciples :

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

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

- De ne jamais oublier ma responsabilité et mes devoirs envers le malade et sa dignité humaine, de respecter le secret professionnel.

- 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 couvert d'opprobre, méprisé de mes confrères, si j'y manque.