UNIVERSITE DE NANTES

_____

FACULTE DE MEDECINE

_____

Année 2017 N° 101

THESE

pour le

DIPLOME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE

DES de Pneumologie

par Sophie Forquenot de La Fortelle
née le 01/12/1989 à Paris XVI

_____

Présentée et soutenue publiquement le 05 Juillet 2017

_____

Exploration des données actimétriques de jour et de nuit au cours de trails en haute altitude

_____

Président : Monsieur le Professeur François-Xavier Blanc

Directeur de thèse : Monsieur le Docteur Arnaud Chambellan

Erratum

En raison d'une analyse approfondie des données du sommeil en analyse appariée, quelques modifications sont apportées :

- *p. 30, au décours de la première phrase, veuillez lire :*

En revanche, en analyse appariée, le temps total de sommeil profond à plus de 3 500m est de 53 min [33], et de 47 min [25]. Cette différence n'est pas significative (p= 0,5).

Au décours de la seconde phrase, veuillez lire :
L'analyse appariée retrouve aussi une augmentation du temps de sommeil léger, avec 53 min de plus à > 3 500 m (p = 0,006). En revanche, si on rapporte la durée de sommeil léger au temps de sommeil total, il n'y a plus de différence : 63% à plus de 3 500m, 60% en plaine (p = 0,14).

- *p. 32 Partie 2.b, au décours de la première phrase, veuillez lire :*

Cette différence n'est pasretrouvé en analyse appariée. La quantité de sommeil profond est identique en altitude à celle de la plaine.

- *p. 32 et 33Partie 3 , veuillez remplacer la 5ème et 6èmephrases par :*

L'augmentation retrouvée dans l'étude du temps de sommeil total est plus importante.

Veuillez remplacer la 13ème phrase par :

En ce qui concerne la non diminution du sommeil profond à plus de 3 500m, les traileurs ont une activité physique très importante, nécessitant un sommeil réparateur que constitue le sommeil profond. Il existe aussi probablement un défaut de précision du SWA.

- *p. 43 Résumé Au lieu de la phrase « il existe une tendance à ce que l'architecture du sommeil soit modifié » , veuillez lire* :

Si la durée allongée et le temps de sommeil totale sont augmentés au cours des trails, l'architecture du sommeil est conservée, avec des proportions globales de durée de sommeil léger, profond et très profond similaires entre la plaine et l'altitude.

Sommaire

Liste des abréviations 6
Table des figures 6
Table des tableaux 6
Tables des annexes 6

Partie I : Etat de l'art

I. Quels impacts a l'environnement en altitude sur le corps humain? ... 8
A. Définition de la haute altitude ... 8
B. Les 4 phases d'adaptation ... 8
C. Adaptation respiratoire à l'hypoxie ... 9
D. Adaptation cardio-vasculaire ... 10
E. Adaptation de l'hématopoièse ... 11
F. Adaptation métabolique ... 11

II. Quels défis représentent les trails en haute altitude ? ... 11
A. Définition ... 11
B. Description de vie pendant les trails ... 12
1. Alimentation et Sommeil ... 12
2. Pathologies ... 12

III. Comment mesurer objectivement l'activité physique en plein air ? ... 13
A. Généralités ... 13
B. Méthodes de mesure de la dépense énergétique liée à l'activité physique ... 13
1. Méthode de mesure par calorimétrie (14) ... 13
2. Une méthode de mesure de l'activité physique « pratique » : l'accélérométrie ... 14

IV. Que sait- on sur le sommeil en haute altitude ? ... 14
A. Généralités sur le sommeil ... 14
1. Enregistrement du sommeil ... 14
2. Le sommeil normal de l'adulte (18-60 ans) ... 14
B. Modifications du sommeil en haute altitude ... 15
1. Modification de la microarchitecture ... 15
2. Modifications respiratoires ... 16
C. Etude du sommeil en haute altitude ... 17

Partie II

I. Objectifs du travail ... 18

II. Sujets et Méthode ... 19
A. Présentation des sujets ... 19
B. Instance réglementaire de la recherche clinique ... 19
C. Type de parcours ... 19
1. Organisation des trails ... 19
2. L'Everest Sky Race ... 19
3. L'Annapurna Mandala Trail ... 19
D. Recueil des données ... 20
1. Données d'activité physique: l'actimètrie ... 20
2. Sommeil ... 20
3. Terrain ... 21
E. Construction de la base de données ... 21
F. Analyses statistiques ... 21

III. Résultats 22
A. Données caractéristiques des sujets 22
B. Données du terrain 22
1. Profil altimétrique 22
2. Comparaison des 2 parcours 23
C. Données actimétriques d'activité physique en haute altitude 23
1. Dépense énergétique totale 23
2. Dépense énergétique active 24
3. Podométrie 25
4. Répartition de l'activité physique journalière 25
D. Impact de la configuration du terrain sur les données actimétriques 25
1. Impact de la distance quotidienne 25
2. Impact du dénivelé quotidien 26
E. Données actimétriques d'activité physique en plaine 26
F. Données actimétriques de la nuit en haute altitude 27
1. Altitude des nuits 27
2. Comparaison des données actimétriques de base en plaine et en altitude 28
3. Sommeil et données du terrain 28
4. Fragmentation du sommeil 29

IV. Discussion 31
A. Evaluation de la validité du SWA dans la mesure des données de dépense énergétique au cours des trails en haute altitude 31
1. Comparaison à la plaine 31
2. Comparaison aux données de la littérature 31
B. Evaluation de la validité du SWA dans la mesure des données de sommeil au cours des trails en haute altitude 32
1. Efficacité et temps de sommeil 32
2. Le SWA à l'épreuve de la détection des différents stades de sommeil 32
3. Hypothèses explicatives 32
C. Données du terrain 33
D. Limites de l'étude 34
1. Partie descriptive 34
2. Partie analytique 34
E. Les objets connectés : une perspective d'avenir ? 34

Résumé 43

Remerciements

Au Professeur François-Xavier Blanc. Vous me faites l'honneur d'accepter de présider ce jury. Veuillez recevoir l'expression de mes hautes salutations

Au Dr Chambellan pour m'avoir proposé ce travail et permis de découvrir le coté recherche de la médecine

Au Dr Dupré pour avoir supervisé le recueil des données lors des trails, et accepté d'être membre du jury

Au Pr Le Tourneau pour avoir accepté d'être membre du jury et de juger ce travail

A mes parents, pour leur force tranquille et leur constant soutien. Merci d'être là, et d'éclairer de votre sagesse toutes les situations, les difficiles comme les plus belles auxquelles ces années m'ont confrontée

A Quiterie, Vianney et Hugues

A Nicole Dumoncel et à François Dumoncel diplômé docteur en médecine en 1830

A Antonin

A Sixtine, Laetitia, Alix, Alexandra, et Anne-Mahaut

A Elodie, Emmeran et Guiral pour avoir rendu pas très wahou ces années nantaises

A Nano et Jeannine

A tous les Justins et Justines, et plus particulièrement à Aymeric (tu peux officiellement m'appeler « ta doc préférée »), Sébastien et Laurent

A ceux avec qui j'ai partagé ces 10 ans d'études: Elodie, Benoît, Gwendoline, Amélie, Guillaume, Lisa, Marie-Gabrielle, Clément, Marc, Nathalie, Mathilde et Maël

Au Dr Benjamin Planquette pour m'avoir transmis la passion de la Pneumologie

Aux équipes para –médicales du 3ème nord pour m'avoir aidé à accompagner les patients lors de leurs derniers instants, et celle du 3ème est/ UMCA

A la Frat' pour ces 2 années de partage d'expérience avec nos patients, et ce soutien si important entre confrères

Liste des abréviations

AMT : Annapurna Mandala Trail
AP : activité physique
CNIL : commission nationale de l'informatique et des libertés
DET : dépense énergétique totale
DEA : dépense énergétique active
ESR : Everest Sky Race
ET : écart type
HA : haute altitude
HCO3- : ions bicarbonates
IAH : index d'apnées-hypopnées
IQR : inter-quartile range
Kcal : kilo-caloriques
Km : kilomètres
L : litres
LCR : liquide céphalo-rachidien
m : mètres
MAM : mal aigu des montagnes
MET : Metabolic Equivalent Task
PaO2 : pression partielle en oxygène
PaCO2 : pression partielle en gaz carbonique
pH : potentiel hydrogène
REM : Rapid Eye Movement = sommeil paradoxal
TST : temps de sommeil total

Table des figures

Figure 1 : schéma représentant les 4 phases d'adaptation en altitude, en fonction du temps 8
Figure 2 : évolution des PaO2 et PCO2 alvéolaires au cours du temps en altitude 10
Figure 3 : représentation qualitative de la structure du sommeil au niveau de la mer et en altitude 15
Figure 4 : l'actimètre SWA 20
Figure 5 : capture d'écran d'un graphique obtenu à partir d'un enregistrement du SWA de 24h 21
Figure 6 : altitudes maximales atteintes en fonction des étapes pour les 2 trails 23
Figure 7 : dépense énergétique totale en kcal par jour dans les 2 trails 24
Figure 8 : dépense énergétique active en kcal par jour dans les 2 trails 24
Figure 9 : nombre de pas réalisés par jour dans les 2 trails 25
Figure 10 : représentation de la dépense énergétique active et de la podométrie moyenne en fonction du dénivelé global 26
Figure 11 : altitude des nuits au cours des deux trails 27
Figure 12 : durée du sommeil léger en minutes en altitude et en plaine 29
Figure 13 : durée du sommeil profond en minutes en altitude et en plaine 29
Figure 14 : durée du sommeil profond en minutes à plus de 3 500 m et en plaine 30

Table des tableaux

Tableau 1 : données caractéristiques des participants aux 2 trails 22
Tableau 2 : principales données de terrain 23
Tableau 3 : comparaison des variables de dépenses énergétiques au cours des trails par rapport à la plaine 27
Tableau 4 : durée du sommeil très profond et de veille intra-sommeil (en minutes) en altitude et en plaine 29
Tableau 5 : répartition des durées de sommeil dans les différents stades (en minutes) à plus de 3 500m et en plaine 30

Table des annexes

Annexe 1 : rapport PDF obtenu à partir d'un enregistrement du SWA 39
Annexe 2 : carte de l'Everest Sky Race (zone Makalu et zone Everest) 40
Annexe 3 : carte de l'Annapurna Mandala Trail 42

Partie I : Etat de l'art

I. Quels impacts a l'environnement en altitude sur le corps humain ?

A. Définition de la haute altitude

L'altitude est définie comme l'élévation verticale d'un lieu ou d'un objet par rapport un à niveau de base (1). La classification des différents niveaux d'altitude est variable selon les sources.

L'équipe de Barry dans son article *Altitude illness* (2) paru en 2003, et repris en 2013 dans l'article de Barry (3) définit une altitude intermédiaire entre 1 500 et 2 500 m, haute de 2 500 à 3 500 m, et très haute de 3 500 à 5 800 m. Dans l'ouvrage *Médecine de l'alpinisme et des sports de montagne*, coordonnée par Jean-Paul Richalet (4), le seuil de haute altitude est à 2 000 m, jusqu'à 5 500 m. La très haute altitude se situe au-delà de 5 500 m.

Sur le plan clinique, les signes de mauvaise tolérance à l'altitude apparaissent aux alentours de 2 500 m. Cette altitude est donc retenue comme seuil de haute altitude (5, 6). Enfin, les personnes vivant au dessus de 2 500 m sont considérées comme des populations de haute altitude (7).

Concernant les répercussions de l'altitude sur l'organisme (4), on observe d'abord une baisse de la consommation maximale d'oxygène (VO2 max), entre 1 000 m et 2 000 m. En haute altitude, les effets sont ressentis à l'effort puis au repos. En très haute altitude, la vie permanente est probablement impossible.

B. Les 4 phases d'adaptation

4 phases d'adaptation à l'altitude se succèdent (4): une phase blanche, une phase d'acclimatation, puis une phase d'acclimatement et enfin une phase de dégradation.

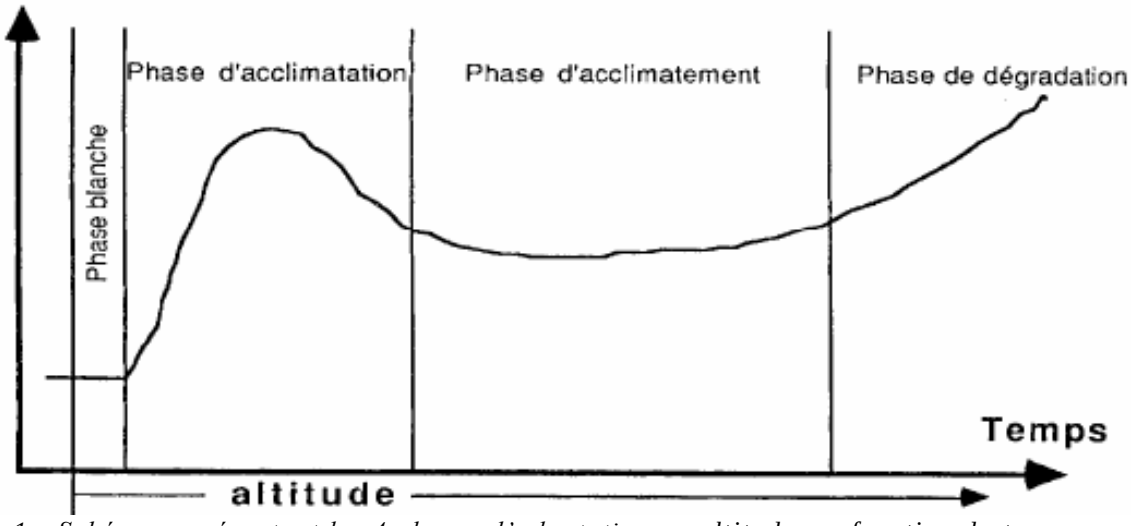


Figure 1 : Schéma représentant les 4 phases d'adaptation en altitude, en fonction du temps

Au cours de la phase blanche il n'y a pas de signes anormaux. Il faut attendre 4 à 8h après une montée pour les voir apparaître.

La phase d'acclimatation est la période de développement des mécanismes d'adaptation à une exposition aiguë à l'hypoxie d'altitude, qui met en jeu des mécanismes réflexes cardiorespiratoires : augmentation du débit ventilatoire par hyperventilation, augmentation du débit cardiaque par tachycardie, qui permettent de façon immédiate d'augmenter l'apport en oxygène aux tissus. Elle est à haut risque de mal aigu des montagnes (MAM). Ensuite, il existe une adaptation à une hypoxie chronique. Elle dure de quelques jours à quelques semaines et passe par des moyens plus économes d'augmenter l'apport d'oxygène aux cellules: augmentation de l'érythropoïèse et polyglobulie. Chaque montée en altitude déclenchera une nouvelle phase d'acclimatation.

La phase d'acclimatement constitue l'état d'adaptation physiologique à une altitude constante. C'est donc un nouvel état stable physiologique. En très haute altitude, cet acclimatement n'est pas durable et un long séjour s'accompagne toujours d'une altération des capacités physiques et mentales, constituant une quatrième phase, dite de dégradation.

C. Adaptation respiratoire à l'hypoxie

L'hypoxie tissulaire a des retentissements importants sur le métabolisme de l'organisme, raison pour laquelle un système d'adaptation à l'hypoxie en altitude est rapidement mis en place par l'organisme (4).

L'air est composé de 21% d'oxygène, 78% de diazote, et moins de 1% de gaz divers parmi lesquels le dioxyde de carbone (0,05%) et l'argon. Cette proportion ne varie pas en fonction de l'altitude. En revanche, la pression partielle en oxygène de l'air dépend de la pression barométrique: elles diminuent de manière exponentielle avec l'altitude. A 5550 m, elles sont divisées par 2. La diminution de la pression alvéolaire en oxygène se traduit par une diminution de la pression partielle en oxygène dans le sang artériel, aboutissant à une hypoxie. Cependant, l'hypoxie en altitude diffère de l'hypoxie secondaire à une hypoventilation, dans laquelle il y a une baisse de la pression alvéolaire en oxygène, ou celle secondaire à une augmentation de la consommation en oxygène de l'organisme. Dans ces 2 cas, l'hypoxémie s'accompagne d'une hypercapnie, par diminution de son élimination, ou par augmentation du métabolisme et donc de la production de CO_2. En altitude l'hypoxie n'est pas associée à l'hypercapnie.

La diminution de la PaO_2 artérielle est détectée par les cellules situées dans les corpuscules carotidiens. L'activation de ces chémorécepteurs entraine une réponse centrale d'hyperventilation réflexe. On obtient ainsi une augmentation de la fréquence respiratoire et du volume courant. De plus, l'activation des chémorécepteurs entraine une stimulation de l'appareil cardio-vasculaire (tachycardie et augmentation compensatrice du débit sanguin). L'hyperventilation, associée à l'hyper-débit, entraine une augmentation de la Pa02 alvéolaire, de l'extraction de l'oxygène par le sang, de la PaO_2 artérielle et donc une meilleure oxygénation des tissus.

En revanche, la pression partielle en CO_2 dans le sang diminue, puisque l'hyperventilation augmente l'élimination du CO_2 au niveau pulmonaire. L'hypocapnie a pour conséquence une alcalose respiratoire. Deux autres types de chémorécepteurs vont alors réagir. Les premiers sont périphériques et activés directement par les modifications de la

PaCO2 sanguine et du pH sanguin, entrainant une réponse immédiate. Les seconds, les récepteurs centraux, sont sensibles aux variations du pH du liquide extracellulaire cérébral, lequel dépend du pH de liquide céphalo-rachidien. Or le LCR n'est pas tamponné par les ions HCO3- de manière aussi efficace que le sang. Les variations de pH au niveau du LCR sont plus importantes qu'au niveau sanguin.

Finalement, l'activation des récepteurs par l'hypocapnie et l'alcalose entraine une diminution de la ventilation : la PaO2 alvéolaire puis artérielle chute. Les deux boucles de régulation mise en jeu s'opposent, aboutissant à une hyperventilation cyclique.

Au bout de quelques jours, pendant la phase d'accommodation, l'alcalose sanguine et cérébrale diminue, par la mise en jeu de systèmes tampon au niveau du LCR, associée à l'élimination rénale de bicarbonates. Le pH sanguin se stabilise à une valeur physiologique, même si l'hypocapnie persiste. La normalisation du pH diminue la stimulation des chémorécepteurs périphériques ; la respiration se régule, l'hyperventilation se stabilise. La PaO2 s'élève et la PCO2 diminue au niveau alvéolaire.

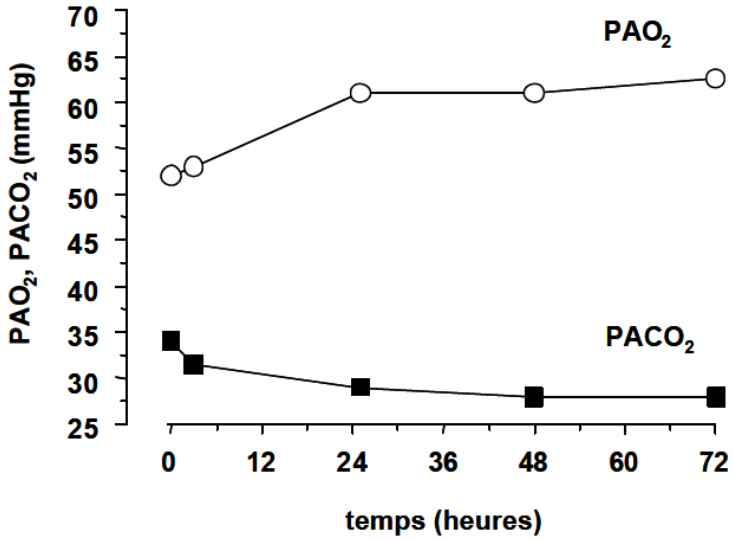


Figure 2 : Evolution des PaO2 et PCO2 alvéolaires au cours du temps en altitude

D. Adaptation cardio-vasculaire

En réponse à la baisse de la saturation en O2 et à l'importante stimulation sympathique, la fréquence cardiaque augmente, aboutissant à une augmentation du débit cardiaque. Lors de la phase d'acclimatation, l'organisme désensibilise progressivement ses récepteurs beta-adrénergiques (8) : la fréquence cardiaque diminue, sans atteindre le niveau habituelle en plaine. Le volume d'éjection systolique varie peu. La consommation en oxygène du myocarde augmente avec l'augmentation du débit cardiaque, nécessitant la dilatation des artères coronaires et l'augmentation du débit sanguin coronaire.

Sur le plan hémodynamique, la pression artérielle systémique s'élève un peu, augmentant la post-charge ventriculaire gauche, et ce malgré l'effet vasodilatateur de l'hypoxie sur la circulation périphérique. L'hypoxie a aussi un effet sur la circulation pulmonaire ; elle induit une vasoconstriction des muscles lisses de la paroi des artérioles de la zone hypoxique. Lorsque l'hypoxie est localisée, cela permet de dévier le sang vers les zones oxygénées : c'est l'effet shunt. En altitude, la vasoconstriction des artérioles pulmonaires est globale puisque la PO2 alvéolaire est diminuée dans tout le poumon ; cela entraine une

augmentation de la pression artérielle pulmonaire au repos et encore plus à l'effort, par augmentation des résistances vasculaires pulmonaires.

E. Adaptation de l'hématopoièse

L'hypoxie stimule la sécrétion d'érythropoïétine par le rein augmentant le nombre de globules rouges (4). Sa concentration maximale est atteinte en 48h et décroit progressivement au-delà, tout en se maintenant à un niveau supérieur à la normale. L'augmentation des réticulocytes est observée après 4 à 5 jours en altitude et la polyglobulie lors d'un séjour de 5 à 7 jours au-delà de 1500 m. La polyglobulie s'accompagne de modification de l'affinité des érythrocytes pour l'O2 : celle-ci augmente en phase d'acclimatation, puis diminue en hypoxie prolongée. Au total, l'augmentation de l'affinité en oxygène du sang augmente la concentration sanguine en oxygène : ainsi, la quantité d'oxygène disponible au niveau tissulaire est plus importante.

F. Adaptation métabolique

Lors d'un séjour en très haute altitude, la perte de poids est quasi-systématique. Selon Rose M.S. (9), l'hypoxie peut suffire à expliquer cet amaigrissement. Elle se fait débord aux dépens de l'eau corporelle, puis de la masse grasse, enfin de la masse maigre. En pratique, elle est probablement secondaire à une diminution des apports hydriques et alimentaires, mais aussi à une altération légère de l'absorption intestinale des graisses et des sucres et à l'augmentation du métabolisme de base (10).

II. Quels défis représentent les trails en haute altitude ?

A. Définition

Dans un contexte qui tend à privilégier le contact avec la nature, l'organisation de trails est en plein essor. Les « trails » (11) ou « courses en nature » sont des manifestations pédestres se déroulant principalement en dehors des routes sans utilisation ni de matériel alpin ni de technique alpine, sur itinéraire matérialisé (excluant l'utilisation de la boussole). On distingue:
- les « Trails Découverte» : distance inférieure à 21 km ;
- les « Trails courts » : distance supérieure ou égale à 21 km et inférieure à 42 km ;
- les « Trails » : distance supérieure ou égale à 42km et inférieure à 80 km ;
- les « Ultra-Trails » : distance supérieure ou égale à 80 km. Lorsque la compétition est longue (distance parcourue > 80km) et qu'elle se déroule sur plusieurs jours avec étapes, on parle plutôt de raid nature.

La pratique sur terrain naturel l'oppose à la course sur piste d'athlétisme. Si la distance à parcourir est une donnée importante, le dénivelé positif et la technicité du terrain sont fondamentaux pour évaluer le parcours. En montagne, ces difficultés techniques sont variées : pentes, sentiers terreux, éboulis, traversée de cols enneigés en haute montagne… Praticables tout au long de l'année, ces courses peuvent avoir lieu de jour ou de nuit. L'ambiance est souvent conviviale, avec une mixité des courses et la présence de sportifs professionnels et amateurs.

En France, la pratique du trail est rattachée à la fédération française d'athlétisme (http://www.athle.fr). Au 1er décembre 2016, elle compte 278 348 licenciés (toutes disciplines confondues). La fédération n'a malheureusement pas de notion du nombre de traileurs. En Juillet 2013, est née l'International Trail-Running association (ITRA). Elle est le fruit de plus de 2 ans de collaboration entre une cinquantaine de passionnées de trails de nationalités différentes. Ensemble, ils ont notamment rédigé une chartre éthique, et mise en place une politique de lutte contre le dopage. Le trail s'est alors défini comme une discipline à part entière. (http://www.i-tra.org)

B. Description de vie pendant les trails

1. Alimentation et Sommeil

La gestion des apports alimentaires et de l'hydratation est essentielle lors des trails. Au cours de la course, les traileurs mangent essentiellement des fruits secs et des barres de céréales pour lutter contre l'épuisement des stocks de glycogène (11). Des ravitaillements sont disponibles au long du parcours sur certains trails, permettant de ne pas surcharger les sacs. L'hydratation est assurée par des boissons diverses (eau purifiée, thé, soupe). Les repas principaux, hors course, souvent le soir sont composés de féculents type lentilles, pomme de terre, riz, pates. L'accès à la viande et aux produits laitiers est difficile en altitude, mais lors des trails dans l'Himalaya, on peut manger du steak et du fromage de Yak.

Les périodes de repos et de nuit se passent sous tente ou en refuge. Les participants dorment alors dans des duvets adaptés aux conditions de haute montagne, afin de ne pas souffrir du froid.

2. Pathologies

La pratique des trails en haute montagne s'apparente aux conditions rencontrées par les alpinistes. La pathologie principale est le MAM (4). Ses symptômes sont peu spécifiques, mais leur association à partir de 2 500 m est caractéristique. Le plus courant est la survenue de céphalées, souvent à l'arrêt de l'effort. Les troubles digestifs associent anorexie, nausées et parfois vomissements. Sur le plan neuropsychologique, une asthénie avec sensation vertigineuse peut apparaître. Enfin, on peut observer une dyspnée anormale à l'effort premier symptôme de l'oedème pulmonaire de haute altitude. Il est favorisé par une vitesse d'ascension rapide, un exercice physique intense et est plus fréquent chez les sujets jeunes, plus sensibles à l'hypoxie (12).

On retrouve aussi les pathologies rencontrées liées à l'environnement et aux traumatismes associés : entorses, lésions musculo-tendineuses, ampoules, plaies, fractures, gelures, déshydratation, hypoglycémie, hypothermie.

III. Comment mesurer objectivement l'activité physique en plein air ?

A. Généralités

L'activité physique est définie par tout mouvement corporel produit par les muscles squelettiques entrainant une dépense énergétique. Il existe plusieurs méthodes de mesure de l'activité physique.

Chaque activité a un coût énergétique, classiquement exprimé en équivalent métabolique. Un MET (Metabolic Equivalent Task) est défini comme la consommation d'oxygène par kilogramme au repos. Sa valeur, correspondant à 3,5 mL d'oxygène par kilo par minute, permet d'exprimer le coût en oxygène et donc le coût énergétique d'une activité physique. Cette unité permet un classement selon le niveau d'activité physique (13) :

- de 1 à 3 METS : activité sédentaire
- de 3 à 6 METS : activité modérée
- de 6 à 9 METS : activité vigoureuse
- supérieur à 9 METS : activité très vigoureuse

B. Méthodes de mesure de la dépense énergétique liée à l'activité physique

1. *Méthode de mesure par calorimétrie (14)*

a) Calorimétrie directe

Une première façon de quantifier la dépense énergétique est de mesurer la production de chaleur corporelle, en laboratoire. La chambre calorimétrique dans laquelle est placé le sujet enregistre la chaleur dissipée à l'exercice par 4 mécanismes : évaporation, convection, conduction, radiation. La quantification des composants de la perte de chaleur permet de calculer la dépense énergétique associée à partir du principe d'égalité entre production de chaleur et dépense énergétique. Cette méthode est néanmoins peu utilisée car les activités physiques dans la chambre hermétique sont limitées.

b) Calorimétrie indirecte

La calorimétrie indirecte est le Gold standard de la mesure du métabolisme énergétique. Elle associe la méthode de l'eau doublement marquée et la calorimétrie respiratoire.

Eau doublement marquée (15) (16)

Un sujet absorbe de l'eau qui contient une quantité connue d'isotopes d'hydrogène et d'oxygène stables. Ils se mélangent à l'eau du corps et s'éliminent sous forme d'eau (respiration, sueur, urine) pour l'hydrogène ou d'eau et de dioxyde de carbone pour l'oxygène. La différence d'élimination des deux isotopes, mesurée par spectrométrie de masse à partir d'échantillons d'urines ou de salive permet d'estimer la quantité de dioxyde de carbone produit pendant la période d'observation (de 4 jours à 3 semaines) conduisant au calcul de la dépense énergétique totale. La dépense énergétique liée à l'activité physique est alors obtenue après déduction du métabolisme de repos et de la thermogénèse alimentaire. Cette méthode est reconnue comme référence (gold standard) pour l'évaluation de la dépense énergétique totale.

Calorimétrie respiratoire

Le muscle en action libère de la chaleur et consomme de l'oxygène, en quantité proportionnelle à l'intensité de l'exercice, et donc au nombre de calories dépensées (1L d'oxygène = 4,82 kcal). Si on mesure la consommation en oxygène, on peut obtenir la dépense énergétique. La calorimétrie respiratoire consiste à mesurer le volume d'oxygène utilisé par un sujet, et à en déduire le nombre de calories dépensées.

2. Une méthode de mesure de l'activité physique « pratique » : l'accélérométrie

Dans le contexte d'activité physique dans l'environnement particulier que représente la montagne, l'ensemble des méthodes de quantification dite de référence ne sont pas adaptées. L'accéléromètre trouve donc toute sa place. Ce petit appareil enregistre les accélérations liées au mouvement du corps (17) dans les 3 axes, qu'il convertit en signaux électriques proportionnels à la force musculaire qui produit le mouvement. Lorsqu'un sujet bouge, le corps accélère en relation avec les forces musculaires responsables de l'accélération et, en théorie, reflète la dépense énergétique. Les données mesurées par les accéléromètres sont intégrées dans des algorithmes permettant de reconnaître d'une part le type d'activité réalisée (marche, vélo) mais aussi l'intensité de la pratique physique. Ainsi, plusieurs données permettant d'évaluer la dépense énergétique sont obtenues de manière non invasive, avec un outil simple d'utilisation. Il a été testé contre les méthodes de référence. (18)

IV. Que sait-on sur le sommeil en haute altitude ?

A. Généralités sur le sommeil

1. Enregistrement du sommeil

Le sommeil est indispensable pour le fonctionnement de l'organisme. Il existe 2 grands moyens de l'enregistrer :

- La polysomnographie : examen complet associant une analyse des capteurs respiratoires, à des enregistrements de l'activité électro-encéphalographique, des mouvements oculaires, et des muscles du menton. Elle permet ainsi de distinguer différentes périodes de sommeil.
- La polygraphie ventilatoire nocturne : utilisation seulement des capteurs respiratoires. Elle est réservée essentiellement au dépistage du syndrome d'apnées du sommeil.

2. Le sommeil normal de l'adulte (18-60 ans)

La nuit d'un adulte jeune se divise en 4 à 6 cycles de sommeil, où alternent différents stades. Le sommeil léger regroupe les stades 1 (2 à 5% de la nuit) et le stade 2. Le stade 2 est majoritaire : il représente 45 à 50% du sommeil de nuit. Le sommeil profond, aussi appelé sommeil à ondes lentes correspond au stade 3 (stade 3 et 4 dans l'ancienne classification) ; il correspond à 20% du sommeil. Enfin le sommeil paradoxal occupe 20 à 25% de la nuit. Il reste 5% du temps correspondant à de la veille.

La latence d'endormissement qui correspond au temps entre l'extinction des lumière et l'apparition du premier stade de sommeil quel qu'il soit doit être inférieur à 30 minutes. L'efficacité du sommeil est le rapport entre le temps de sommeil réel et le temps d'enregistrement ; elle est normalement supérieure à 85%.

B. Modifications du sommeil en haute altitude

1. Modification de la microarchitecture

Il a été mis en évidence des modifications de la microstructure du sommeil en altitude. Historiquement, la première étude du sommeil en altitude date de 1970 ; elle a consisté en l'enregistrement du sommeil de deux hommes à plus de 3 000m en Antarctique. Il est constaté une quasi absence de sommeil profond, une diminution du sommeil paradoxal, et la présence d'une respiration périodique associée à des micro-éveils (19).

Dans des études observationnelles récentes, le plus grand changement dans la microarchitecture du sommeil est la diminution du sommeil profond, et de la continuité du sommeil. La figure 3 illustre parfaitement ces modifications de la microstructure. Ainsi, en altitude, la quantité de sommeil REM et celle du sommeil lent profond (NR3, 4) sont diminuées, au profil des stades légers (NR1 –NR2).

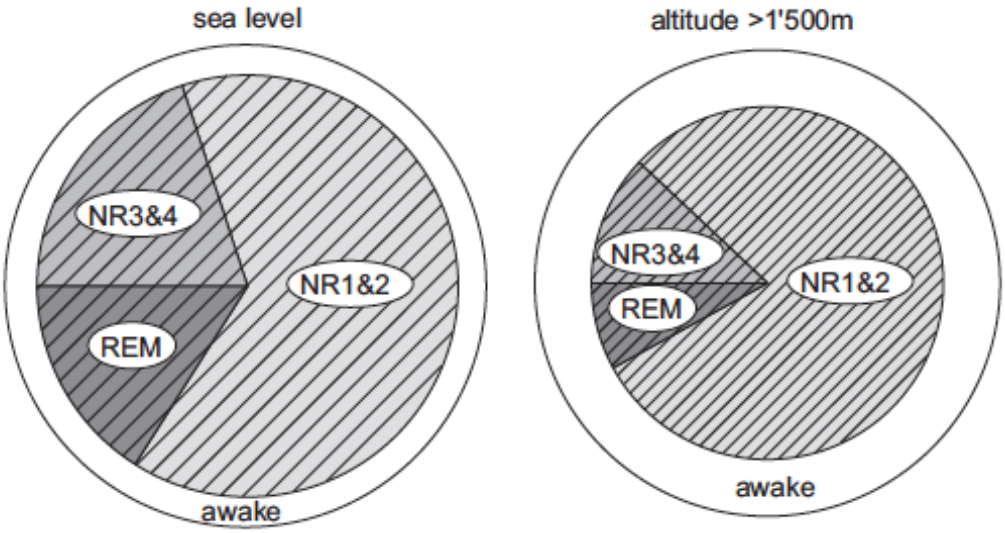


Figure 3 : représentation qualitative de la structure du sommeil au niveau de la mer (sea level) et en altitude. REM= sommeil paradoxal. NR= sommeil non REM

En 2008, l'équipe de P. Jonhson (20) a étudié en détail le sommeil en haute altitude, ainsi que ses relations avec la respiration périodique. 10 sujets ont été inclus. Ils ont dormi au niveau de la mer, puis à 5 altitudes différentes (1 400, 3 500, 3 900, 4 200, 5 000 m) dans l'Himalaya au Népal, sous polysomnographie. Des gaz du sang étaient prélevés chaque matin. L'augmentation d'altitude entraine une majoration de l'hypoxie, de l'hypocapnie, et une alcalose. Le temps total de stade N1 augmente à partir de 3 500 m ($p<0,001$), le temps total de sommeil lent profond diminue en fonction de l'altitude. Le REM est globalement conservé.

On peut citer l'article de l'équipe de Latshang publié en 2013 (21), qui a consisté en l'enregistrement de 51 jeunes hommes vivant habituellement à moins de 800 m d'altitude, 1 nuit à 490 m, 2 nuits à 1 630 m, et 2 nuits à 2 590 m. On observe une baisse de la proportion du sommeil profond (stade 3 et 4) au dessus de 1 650 m. Il est de 21% à 2 590 m versus 24% à 490 m (différence statistiquement significative).

De même, l'étude de Stadelmann (22) retrouve une diminution des ondes lentes, caractéristiques du sommeil profond après analyse de polysomnographies de nuits passées au dessus de 1 630 m, de 44 jeunes hommes vivant en dessous de 800 m. Elle est réduite de 4% à 1 630 m et de 15% à 2 590 m. Cette modification de l'architecture du sommeil est corrélée avec la diminution de la saturation et les variations de la respiration en altitude. Les apnées centrales augmentent en moyenne altitude, et la saturation en oxygène décroit. Le sommeil à ondes lentes est inversement corrélé avec les IAH central et la saturation. En revanche, les spindles, caractéristiques du stade 2 du sommeil sont corrélés positivement avec la saturation. Sur le plan physiologique, ils avancent l'hypothèse que la réduction de l'hyperpolarisation des neurones thalamiques due à l'activation sympathique en altitude favorise les spindles et la diminution du sommeil à ondes lentes.

2. Modifications respiratoires

En altitude, le corps humain est soumis à une hypoxie. L'adaptation à cette hypoxie est constituée d'un ensemble de mécanismes détaillés dans la première partie. La réduction de la concentration en oxygène du sang induit une instabilité ventilatoire. Pendant le sommeil elle se traduit par une alternance de période de respiration rapide et d'apnées centrales, appelée respiration périodique d'altitude. Ce phénomène est observé chez des personnes en parfaite santé, dès 1 820 m. En haute altitude, le niveau de CO2 dans le sang peut chuter très bas, et ainsi créer une absence de commande automatique au niveau central, aboutissant à une apnée. C'est seulement lorsque les chémorécepteurs à l'oxygène détectent une hypoxie que la commande centrale se réactive.

Les conséquences sur la fragmentation du sommeil sont majeures. Les variations respiratoires entrainent des micro-éveils. L'article de Anholm (23) étudiant le sommeil chez 8 adultes ayant passé 6 semaines dans un caisson de décompression hypobarometrique et hypoxique, rapporte 22 micro-éveils en moyenne au niveau de la mer versus 161/h à 7 600 m. L'équipe de Shogilev (24) établit un lien entre réveils nocturnes et respiration périodique. Ils ont enregistré la saturation par oxymétrie de pouls et les réveils nocturnes par actigraphie de 4 sujets pendant une marche au Népal. 145 heures de sommeil sur les 187 enregistrées ont au moins un épisode de respiration périodique. 10% du temps de sommeil total est ainsi caractérisé par une respiration périodique, durant laquelle 30% des éveils nocturnes ont lieu. Cette association est supérieure à celle attendu par le « hasard ». Cela suggère que la respiration périodique joue certainement un rôle dans les éveils nocturnes en altitude.

En revanche, l'équipe de Reite (25) qui a enregistré 6 jeunes hommes, 2 nuits au niveau de la mer et 4 nuits non consécutives à 4 300 m, ne retrouve pas d'association claire entre la respiration périodique et l'augmentation des micro-éveils. Le sommeil tend à redevenir équivalent à celui au niveau de la mer au bout de 12 jours d'altitude. Nussbaumer-Ochsner et son équipe (26) ont conclu en 2011 que chez les personnes en bonne forme physique qui montent rapidement en haute altitude, la qualité du sommeil est diminuée, mais s'améliore avec l'acclimatation, en lien avec l'augmentation de la saturation en oxygène. La respiration périodique quant à elle persiste. Les perturbations du sommeil en altitude semblent donc liées à l'hypoxie plutôt qu'à la respiration périodique.

C. Etude du sommeil en haute altitude

La polysomnographie est le gold standard pour étudier le sommeil. Cependant, la complexité de la mise en place des différents capteurs incite à trouver d'autres manières d'étudier le sommeil, notamment dans des conditions environnementales particulières. Le développement des actimètres permettant l'enregistrement de l'activité physique, a permis de simplifier l'étude du sommeil puisque ceux-ci sont capables de mesurer les cycles veilles/ sommeil, par analyse des mouvements.

Dans l'article de Nussbaumer-Ochsner (26), le sommeil de 14 volontaires a été enregistré par actimètre et polysomnographie, au cours d'une nuit à 500 m d'altitude, et 4 nuits à 4 550 m. La différence moyenne entre les 2 appareils était de 5 ± 35 min pour le temps total de sommeil, et de 1 ± 7% pour l'efficacité du sommeil. La proportion de sommeil lent et de sommeil paradoxal était réduite en altitude, tandis que les réveils nocturnes étaient plus importants ($p<0,005$). Il en a donc été conclu que l'actimètre estimait de manière précise l'efficacité du sommeil et le temps de sommeil total. Sa simplicité d'utilisation et son port possible pendant plusieurs jours en font un outil intéressant pour étudier les effets de l'altitude sur le sommeil.

Un article plus récent publié en 2016 par l'équipe de Latshang (27) rapporte qu'après enregistrements de 255 polysomnographies comparées à 449 actimétries (enregistrement simultanée avec 1 actimètre uniaxial sur un poignet, un tri-axial sur l'autre poignet, et un tri-axial sur la cheville) chez des hommes pour des nuits à 490 m, 1 630 m et 2 590 m d'altitude indique que l'estimation du temps de sommeil total était comparable. Le temps total de sommeil médian en polysomonographie était de 397 à 408 minutes. L'estimation du temps de sommeil par actimétrie variait pour le poignet de +1 min pour l'uniaxial, -7 min pour le tri-axial, et de +6 min pour le tri-axial à la cheville. L'actimètre est donc valide pour étudier les effets de l'altitude et autres facteurs environnementaux sur le temps de sommeil total, la latence d'endormissement et l'efficacité du sommeil lors d'expéditions de plusieurs jours.

Partie II :

I. Objectifs du travail

A partir de l'expérience d'un médecin du sport, himalayiste passionnée qui accompagne régulièrement à des trails en haute altitude, l'idée a germé de récolter des informations afin de quantifier l'activité physique lors de ces épreuves. Elles se caractérisent par un haut niveau d'activité physique, dans un environnement exigeant que constitue la haute altitude.

Dans la mesure où actuellement il n'existe pas de données sur le niveau d'activité physique réalisé dans cet environnement, il a semblé intéressant de tester l'utilité de l'outil actimétrique.

Dans un premier temps, on évalue la cohérence des données de l'actimètre lors des trails, et ainsi on teste leur robustesse. Puis, on cherche à savoir s'il existe des impacts des données du terrain sur les variables d'activités physiques. Enfin, on s'intéresse aux effets de l'altitude et de l'activité physique sur le sommeil.

II. Sujets et Méthode

A. Présentation des sujets

L'étude porte sur quatorze sujets. Six personnes ont participé au Trail de l'Everest Sky Race (ESR), et huit personnes à l'Annapurna Mandala Trail (AMT). Ils pratiquent le trail comme activité de loisir. Ils étaient tous bénévoles pour participer à l'étude.

B. Instance réglementaire de la recherche clinique

Il s'agissait de sujets volontaires. Ils ont reçu une lettre d'information écrite, et ont signé un consentement. La base a été déclarée au CNIL et est référencé 2016-047. Cette étude respecte les principes de la déclaration d'Helsinki.

C. Type de parcours

1. Organisation des trails

Les trails sont organisées par l'association des Chevaliers du Vent (http://www.leschevaliersduvent.fr). Précurseur des trails en haute altitude, la première édition de l'AMT a eu lieu en mars 2000, célébrant ainsi le 50ème anniversaire de la conquête de l'Annapurna. S'il existait des grandes courses à cette époque, l'AMT a constitué la première course à pied (avec notion de compétition), qui s'engageait à une si haute altitude (5 416 m au Thorong Pass). A l'époque, elle avait été qualifiée par un des membres de l'Himalayan Rescue Association, comme « la course d'altitude la plus rapide du monde en dénivelé ascensionnel ». Depuis, les Chevaliers du vent ne cessent de « courir le ciel » en organisant des séjours en lien avec des professionnels du tourisme népalais, assurant la logistique.

2. L'Everest Sky Race

Lors de la septième édition de l'ESR, les organisateurs ont proposé un parcours au départ de Num (1 560 m), en passant par le Camp de Base du Makalu (4 823 m), avant de relier le Camp de Base du Mont-Everest (5 364 m), en prenant par la route du Sud : Salpa Bhanjyang (3 414 m), Pankongma La (3 178 m) et Surke La (3 170 m). Elle s'est déroulée en 13 étapes, du 1 au 13 novembre 2015. Certains participants ont complété le trail par l'ascension du Kalapatar et de l'Island Peak.

3. L'Annapurna Mandala Trail

En avril 2016, la 16ème edition de l'AMT a fait le Tour du Manaslu, en passant par la Tsum Valley (la Vallée de la Lumière), a franchit le Larkya La (5 210 m) et a rejoint l'Anneau des Annapurnas, entre Dharapani et Manang. L'itinéraire a longé le Tilicho Lake (4 920 m), passé l'Eastern Pass (5 340 m) et le Mandala Pass by Nil Gurung (5 300 m). La course est allée au camp de base du Ganesh Himal avant de remonter vers le nord, jusqu'à la frontière avec le Tibet.

D. Recueil des données

1. *Données d'activité physique: l'actimètrie*

Les participants ont porté au bras 24 heures sur 24, un capteur multiparamétique pendant l'ensemble du trail, et quelques semaines après leur retour, en plaine. Il s'agissait du modèle SenseWear ARMBAND de Body Media (SWA) Inc, un actimètre tri-axial, permettant de recueillir les données. Le capteur devait être porté 24h sur 24, mais il était possible de le retirer transitoirement pour prendre une douche par exemple. La durée de port correspond à la durée d'enregistrement sur une journée. Pour valider les données d'activité physique, un enregistrement de plus de 90% de la journée est nécessaire.

Figure 4 : L'actimètre SWA

a) Quantification de l'activité physique

Les durées d'activité physique globale (définie par une activité supérieure à 3 MET), d'intensité légère (1,5-3 METs), modérée (3-6METs), vigoureuse (6-9METs), très vigoureuse (>9METs), ainsi que l'activité sédentaire sont enregistrées par le SWA. Il permet aussi de comptabiliser le nombre de pas réalisés chaque jour.

b) Dépense énergétique

Le SWA fournit une information sur la dépense énergétique totale et active correspondant à une activité physique supérieure à 3 MET. Il mesure le Metabolic Equivalent Task (MET) et le niveau d'activité physique (PAL) moyen par jour.

2. *Sommeil*

Les données sommeil étaient valides si elles représentaient plus de 90% de la nuit. Le SWA calcule le temps passé allongée, et le temps total de sommeil. Le rapport durée de sommeil sur durée allongée permet d'obtenir l'efficacité du sommeil. Un rapport inférieur à 85% témoigne d'une efficacité réduite.

Le SWA identifie 4 stades au cours du sommeil : sommeil léger, sommeil profond, sommeil très profond et veille intra-sommeil. Il est possible via le graphique d'additionner toutes les durées passées dans les différents stades de sommeil, et ainsi d'obtenir un hypnogramme pour chaque nuit.

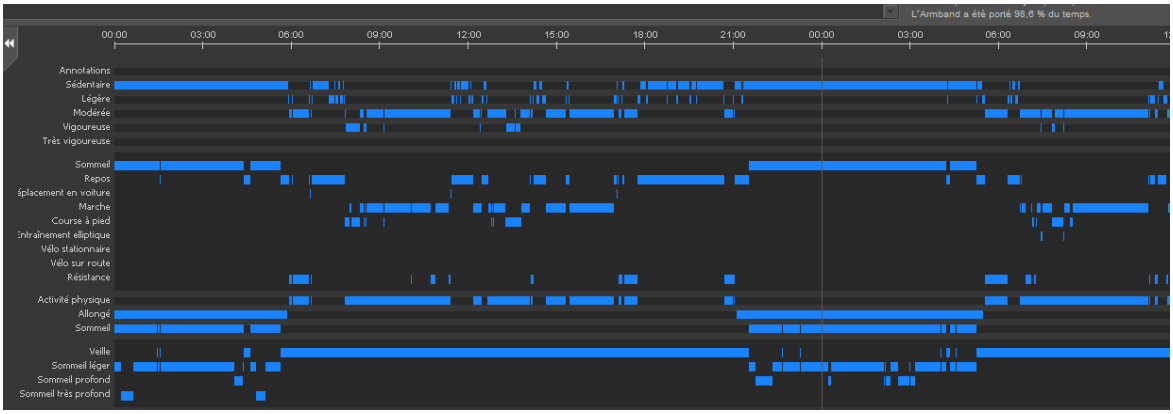


Figure 5 : Capture d'écran d'un graphique obtenu à partir d'un enregistrement du SWA de 24h

3. *Terrain*

Les caractéristiques journalières du terrain ont été recueilli par un GPS (GARMIN fenix 3) porté par l'un des concurrents pendant toute la durée du parcours. Avec les altitudes du matin, maximales et minimales, atteintes de la journée, un profil altimétrique a pu être établi. L'enregistrement des dénivelés positifs et négatifs, et de la distance parcourue par jour permet d'évaluer la difficulté liée au terrain.

E. Construction de la base de données

Les données de l'actimètre sont extraites à l'aide d'un logiciel, le Bodymedia Senswear sofware. Dans un premier temps, nous avons extrait les données sous forme d'un PDF (annexe 1). Les 15 variables enregistrées par jour, par traileurs ont été reportées dans un fichier excel. Pour obtenir le détail des données du sommeil, nous avons compté, pour chaque nuit, chaque durée dans les différents stades. Le même travail a été réalisé pour les données de plaine. Enfin, les caractéristiques du terrain (altitude maximale et minimale par jour, altitude de la nuit, dénivelé positif, dénivelé négatif, dénivelé cumulé et global, distance parcourue pour chaque jour de trails) complètent la base.

F. Analyses statistiques

Les variables quantitatives ont toutes été analysées dans leur distribution (test de Shapiro-Wilk). En cas de normalité, elles sont exprimées par leur moyenne encadrée de l'écart type. Dans le cas contraire, par la médiane encadrée des 1er et 3ème quartiles ou des valeurs minimales et maximales.

La plupart des données n'ayant pas une distribution normales sont rapportées avec leur médiane encadrée des 1er et 3ème quartiles [IQR]. Les comparaisons de plusieurs variables ont été réalisées par des tests non paramétriques de type Mann-Whitney en cas de comparaison de 2 groupes, ou d'ANOVA au delà. L'étude des déterminants des variables d'activité physique ont été approchés d'abord par une analyse univariée qui a permis de sélectionner les variables indépendantes pertinentes (p value < 0,2).

Le logiciel utilisé pour les statistiques est le logiciel Sigma Plot version 11.0. Le seuil de significativité retenu est une p-value < 0,05.

III. Résultats

A. Données caractéristiques des sujets

Lors de l'ESR, sept personnes ont donné leur accord pour participer à l'étude. Malheureusement, l'enregistrement d'un participant (le numéro 7) n'a pu être obtenu en raison d'une panne du SWA. De ce fait, les données d'activité physique de six personnes majeures (4 hommes, 2 femmes), ayant tous eu une expérience en haute altitude ont été recueillies. L'âge moyen des participants était de 54 ± 14 ans. Deux avaient un antécédent de MAM. Ils pratiquaient tous une activité physique régulière, et aucun n'était fumeur.

Huit participants (5 hommes, 3 femmes) ont porté le SWA pendant toute la durée de la course AMT. Sept d'entre eux pratiquaient une activité physique régulière. Ils avaient tous déjà eu une expérience en haute altitude, et aucun n'avait présenté de MAM. Ils étaient un plus jeunes que dans l'ESR, avec un âge moyen de 48 ±13 ans (différence non significative p= 0,189, test de Mann-Whitney).

Trail	Sujets	Age	Sexe	IMC	Altitude antérieure maximale atteinte (m)	Antécédent MAM
ESR	1	64	M	22,2	6500	Non
ESR	2	63	M	20,8	5800	Non
ESR	3	24	F	20	4060	Non
ESR	4	48	M	21,8	6400	Non
ESR	5	64	F	21,1	6000	Oui
ESR	6	57	M	22,9	8030	Oui
ESR	7	58	M	21	5600	Non
AMT	8	50	F	18,9	5400	Non
AMT	9	53	F	22,2	5400	Non
AMT	10	42	F	22,6	6600	Non
AMT	11	23	M	22,8	4200	Non
AMT	12	53	M	21,9	4300	Non
AMT	13	62	M	20,7	5460	Non
AMT	14	62	M	23,4	6000	Non
AMT	15	42	M	22,4	6100	Non

Tableau 1 : données caractéristiques des participants aux 2 trails

B. Données du terrain

1. Profil altimétrique

Les données GPS permettent d'obtenir les différentes altitudes atteintes au cours des deux trails. L'altitude moyenne de l'ESR est un peu plus basse que celle de l'AMT : 3 068 m, versus 3 287 m. Cette différence n'est pas statistiquement significative. En revanche, le tracé des parcours diffère. Au cours de l'ESR, l'altitude maximale de 4 883 m est atteinte dès le 4ème jour. Les traileurs redescendent ensuite pendant 3 jours, avant de reprendre une ascension jusqu'à 4 285 m, correspondant à la dernière étape. Concernant l'AMT, la montée en haute altitude est plus progressive ; ils passent la barre des 5 000 m au 8ème jour, puis redescendent à 3 545 m, avant d'atteindre 5 382 m, altitude maximale à la dernière étape.

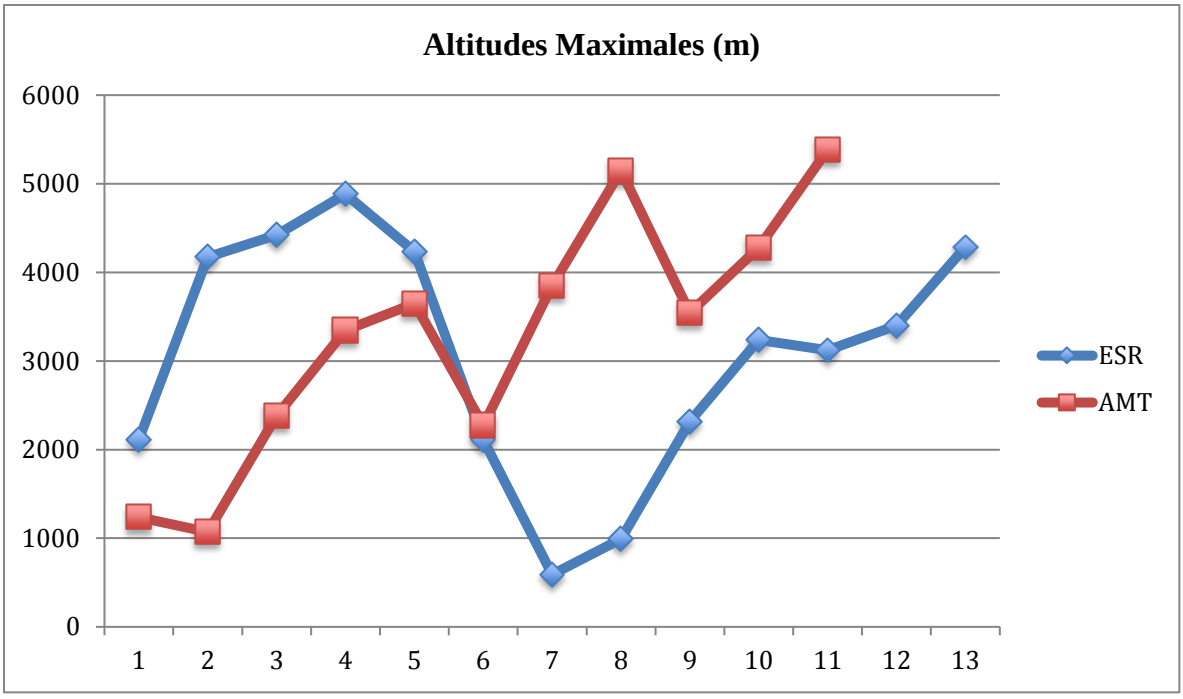


Figure 6 : Altitudes maximales atteintes en fonction des étapes pour les 2 trails

2. *Comparaison des 2 parcours*

Au cours de l'ESR, 316 km ont été parcourus, en 13 étapes. Le dénivelé cumulé positif total a été de 19 875 m, le négatif de 17 195 m ; le dénivelé global a donc été de 37 070 m. L'AMT a été plus long : 376 km en 11 étapes, avec un dénivelé cumulé positif de 19 721 m, un négatif de 18 518 m, et un global de 38 239 m.

	ESR		AMT		
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	p
Distance/j (km)	24	10	34,2	9,2	0,02
Dénivelé cumulé positif/j (m)	1529	720	1793	427	0,28
Dénivelé cumulé négatif/j (m)	1323	906	1683	1054	0,38
Dénivelé cumulé /j (m)	2852	1302	3476	1096	0,22

Tableau 2 : principales données de terrain (Test t de Student)

Les traileurs de l'ESR font en moyenne 10km/j de moins que ceux de l'AMT. Le reste des données de terrain sont comparables.

C. Données actimétriques d'activité physique en haute altitude

1. *Dépense énergétique totale*

La dépense énergétique totale médiane de l'ESR est de 3 885 kcal [IQR: 3 582-4 286], soit plus petite que celle de l'AMT qui est de 4 338 kcal [3 694-5 002]. Cette différence est statistiquement significative avec p =0,001.

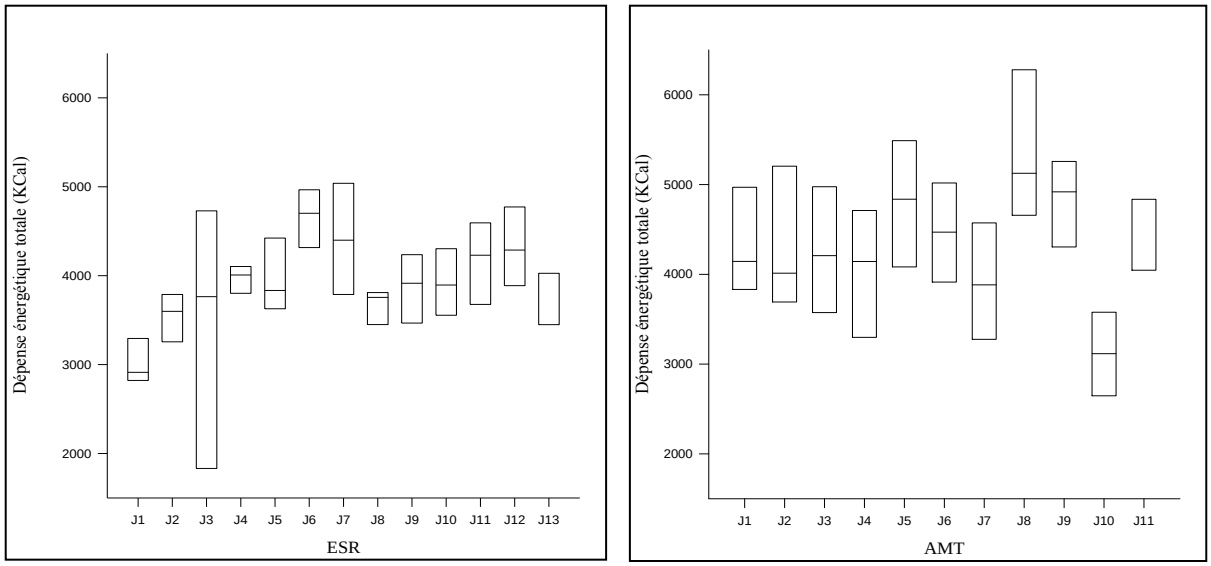


Figure 7 : Dépense énergétique totale en kcal par jour dans les 2 trails. Les résultats sont présentés sous forme de médiane encadrée des valeurs des 1er et 3ème quartile pour l'ensemble des sujets

Au cours de l'ESR, il y a eu 7 jours pendant lesquels les valeurs de DET étaient comprises entre 3 500 et 4 000 kcal, 5 jours où elles étaient supérieures à 4 000, avec un maximum de 4 701 kcal [4 315-4 965] à J6 en valeur médiane. La DET est plus élevée au cours de l'AMT avec seulement 2 jours à moins de 4 000 kcal (J7 et J10), et un jour maximal à 5 125kcal [4 657-6 278], le 8eme jour.

2. *Dépense énergétique active*

La dépense énergétique active médiane de l'ESR est de 2 785 kcal [2 294-3 227], soit plus petite que celle de l'AMT qui est de 3 348 kcal [2 715-3 781]. Cette différence est statistiquement significative avec p =0,001.

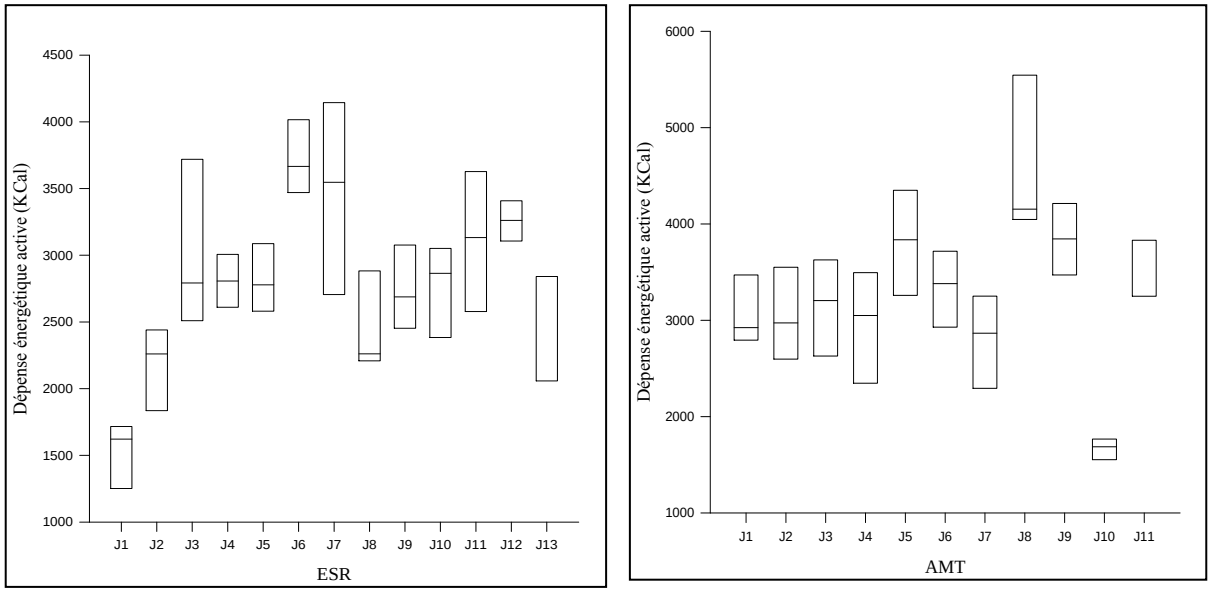


Figure 8 : Dépense énergétique active en kcal par jour dans les 2 trails. Les résultats sont présentés sous forme de médiane encadrée des valeurs des 1er et 3ème quartile pour l'ensemble des sujets

Les journées de l'ESR requièrent une dépense énergétique active essentiellement comprise entre 2 500 et 3 500 kcal (7 jours/13). Le maximum est atteint à J6 avec 3 666 kcal [3 469- 4 015]. La DEA journalière médiane de l'AMT est plus régulière, aux alentours de 3 000 kcal. Le pic est atteint à J 8 avec une DEA à 4 153 kcal [4 046- 5 544].

3. *Podométrie*

La variable podométrie journalière au cours de l'ESR a une distribution normale, ce qui n'est pas le cas de celle de l'AMT. Pour la comparaison des 2 séries, elles sont exprimées sous la forme de leur médiane encadrée de leur IQR. Sur l'ensemble du trail, elle est de 36 472 pas/j [29 332 - 41 683] pour l'ESR et de 48 218 [42 355 - 58 743] pour l'AMT. La différence est très significativement supérieure dans l'AMT ($p < 10^{-3}$).

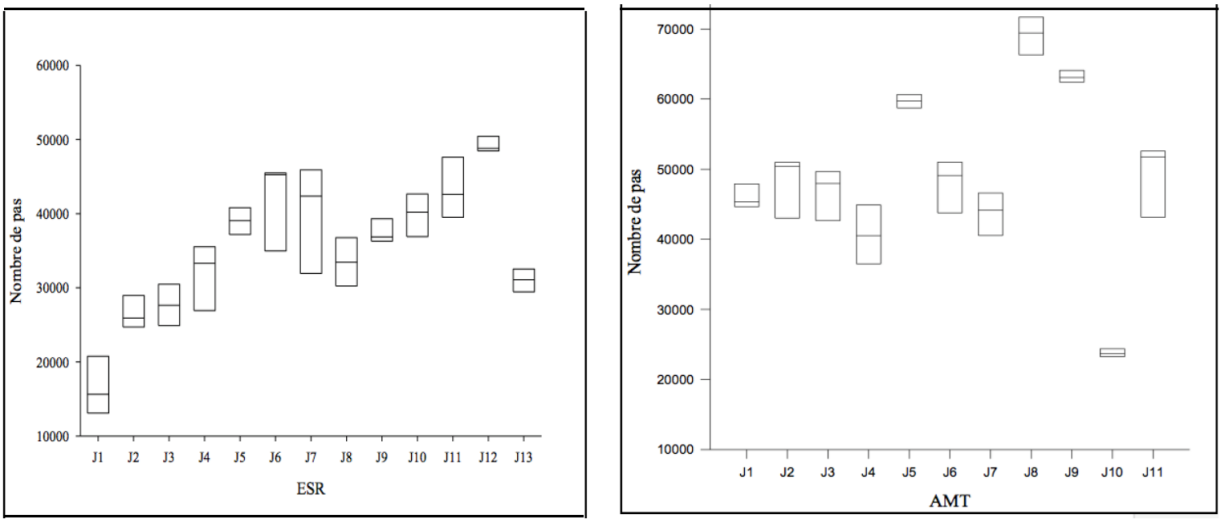


Figure 9 : Nombre de pas réalisés par jour dans les 2 trails. Les résultats sont présentés sous forme de médiane encadrée des valeurs des 1er et 3ème quartile

4. *Répartition de l'activité physique journalière*

En poolant les données des 2 trails, on constate que les participants ont essentiellement une activité physique d'intensité modérée ; ils y passent en moyenne 7h 23 ± 2h43. Le temps passée en activité vigoureuse et très vigoureuse sont respectivement de 1h30 ±1h22, et de 16 ± 32 min. Enfin, ils consacrent 2h14 ±1h10 à une activité physique légère lors d'une journée de trail.

D. Impact de la configuration du terrain sur les données actimétriques

1. *Impact de la distance quotidienne*

Les analyses de corrélation de Spearman entre distance et podométrie retrouve un coefficient de corrélation à 0,843 avec une p-value à 10^{-6}. Plus la distance est longue, plus logiquement le nombre de pas augmente.

De même, plus la distance est grande, plus la dépense énergétique active est élevée ($r = 0,707$; $p < 0,05$).

2. *Impact du dénivelé quotidien*

Concernant le dénivelé cumulé, plus celui-ci augmente plus le nombre de pas augmente (r = 0, 463 ; p = 0,02). Le coefficient de corrélation entre la DEA et le dénivelé est à 0,435, mais la relation n'est pas significative (p = 0,23). Il n'a pas été retrouvé de corrélations significatives notables entre les dénivelés et les autres données actimétriques de dépense énergétique.

La DEA moyenne des journées avec un dénivelé global positif est de 2 733 kcal [822], inférieure aux journées avec un dénivelé global négatif 3 440 kcal [810]. Cette différence est significative (p < 0,001 ; t-test de Student, après vérification de la normalité par le test de Shapiro-Wilk).

La podométrie moyenne des journées avec un dénivelé global positif est de 38 236 pas/j [13 392], inférieure aux journées avec un dénivelé global négatif 47 348 pas/j [12 110]. Cette différence est aussi significative (p < 0,001 ; t-test de Student, après vérification de la normalité par le test de Shapiro-Wilk).

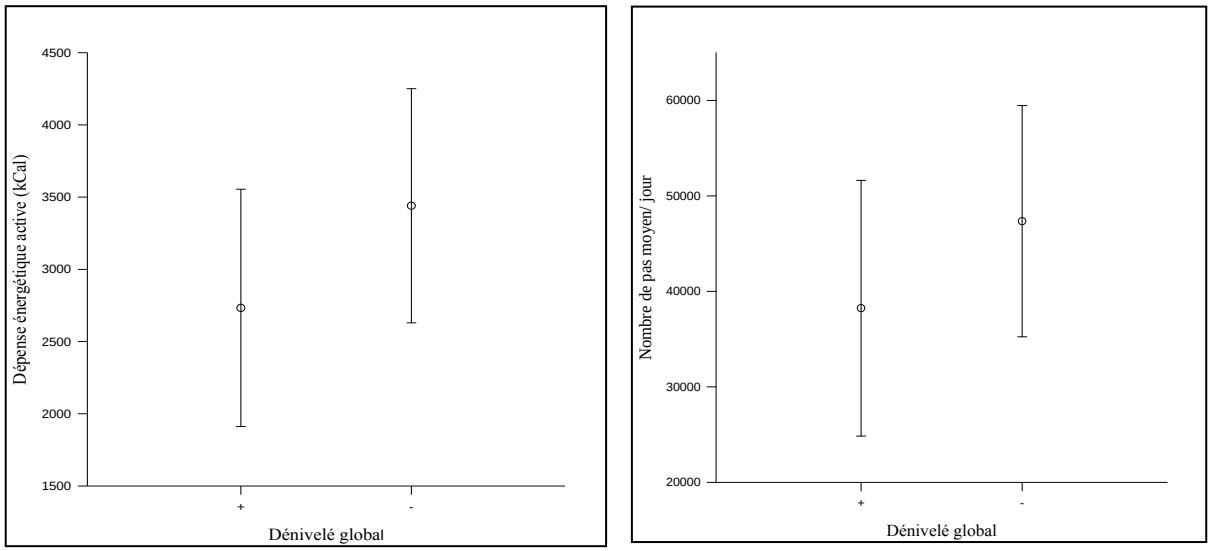


Figure 10 : Représentation de la dépense énergétique active et de la podométrie moyenne en fonction du dénivelé global. Les graphiques présentent les données sous forme de moyenne et d'écart type

E. Données actimétriques d'activité physique en plaine

Si on s'intéresse aux données en plaine, en regroupant les participants des deux trails, on obtient une DET médiane de 2 505 kcal [2 147-2 940]. La dépense énergétique active est à 789 kcal [309 - 1 139]. La podométrie médiane est de 8 489 pas/ j [5 350-14 543].

	Nombre de pas/ jour	Rapport pas/j Trail/ plaine	DEA/j (kcal)	Rapport DEA/j Trail/ plaine
ESR	35 630	4,2	2 785	3,5
AMT	48 218	5,6	3 348	4,2
Plaine	8 489		789	

Tableau 3 : comparaison des variables de dépenses énergétiques au cours des trails par rapport à la plaine

En comparant la podométrie de chacun des trails à celle de la plaine, on constate que les participants de l'ESR ont marché 4 fois plus que d'habitude, et les participants de l'AMT 6 fois plus. En terme de podométrie, l'AMT a nécessité 35 % de pas de plus que l'ESR.

La dépense énergétique active de l'ESR est 3,5 fois supérieure à celle de la plaine ; l'AMT a une dépense énergétique active de 4,2 fois celle habituelle. Les traileurs de l'Annapurna ont donc dépensé 20% de plus en terme d'énergie active que ceux de l'Everest.

En ce qui concerne la répartition du temps passé dans les différents niveaux d'activités physiques, on observe une durée moyenne d'activité physique légère de 5h36 ± 2h13, modérée de 1h58 ± 1h33, 17 ± 28min d'intensité vigoureuse et 18 ± 34 min de très vigoureuse.

F. Données actimétriques de la nuit en haute altitude

1. *Altitude des nuits*

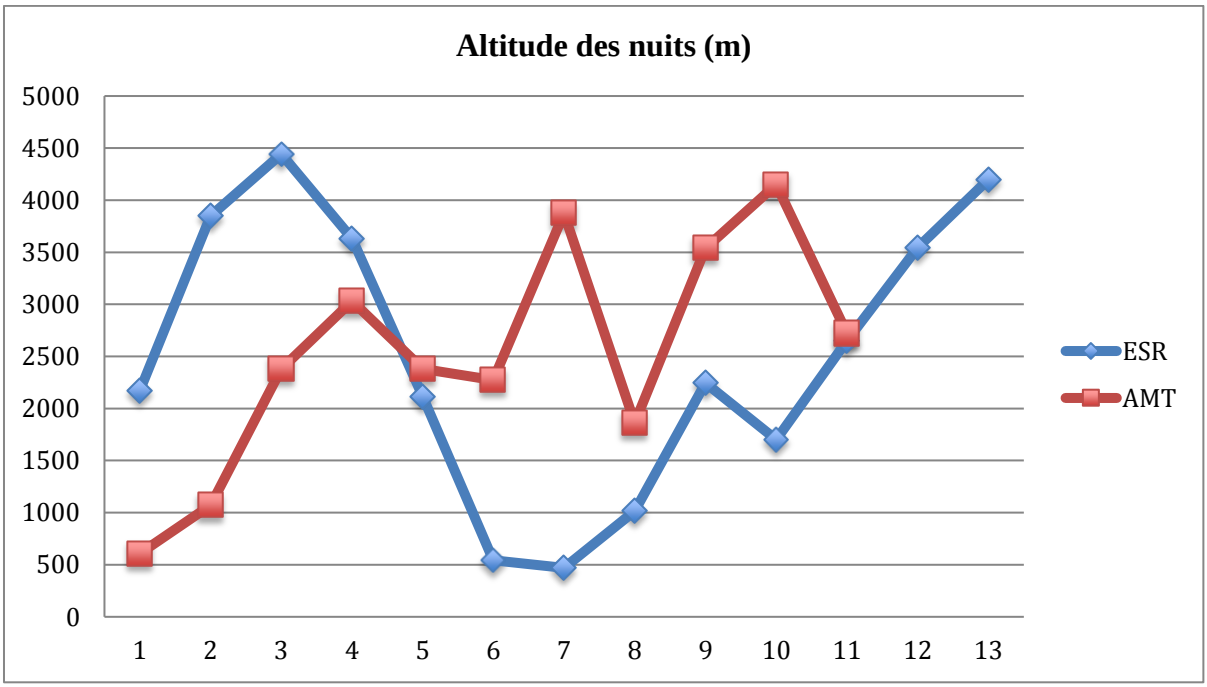


Figure 11 : Altitude des nuits au cours des deux trails

La moyenne des nuits en trail est de 2 500 m pour les deux trails. Lors du trail ESR, les participants dorment rapidement en haute altitude, puisque la 3ème nuit est à 4 500 m. Ils redescendent ensuite avec 6 nuits au-dessous de 2 500 m, avant de dormir à nouveau en haute altitude (2 600 m, 3 500 m, et 4 200 m). Lors de l'AMT, la montée est plus progressive

puisque la première nuit à 4 000 m a lieu au bout de 7 jours de trail. Au total, 3 nuits se passent au-dessus de 3 500 m pour l'AMT, et 5 pour l'ESR.

2. Comparaison des données actimétriques de base en plaine et en altitude

L'efficacité du sommeil en altitude est de 87% [79-91], quasiment identique à celle en plaine qui est de 86% [78-92].

Cependant, si on s'intéresse aux deux éléments qui la composent, on observe que la durée allongée est plus élevée lors des trails avec 513 minutes en valeur médiane [466-570] versus 454 min [376-528] en plaine (p= 0,001). Les traileurs dorment 50 minutes de plus en valeur médiane avec 437 min [388-493] versus 387 min [308-444] en plaine (p = 0,001).

3. Sommeil et données du terrain

a) Efficacité du sommeil

L'efficacité du sommeil est influencée par différentes variables. Concernant les variables de terrain, plus le dénivelé cumulé de la journée augmente, plus l'efficacité du sommeil de la nuit suivante diminue (r =-0,701, p = 0,008).

On note une tendance à ce que plus la distance parcourue dans la journée augmente, plus l'efficacité de sommeil de la nuit suivante diminue (r = -0,701, p =0,08).

Des variables de dépenses énergétiques influent aussi sur l'efficacité du sommeil : ainsi, la DEA (r = -0,212, p = 0,01), la durée passée en AP vigoureuse (r= - 0,219, p = 0,01) et très vigoureuse (r= - 0,262, p = 0,002) sont négativement corrélées avec l'efficacité du sommeil.

b) Sommeil léger

Plus l'efficacité du sommeil augmente, plus la durée de sommeil léger augmente (r= 0,373, p<0,001).

En revanche, la durée de sommeil léger diminue lorsque la distance parcourue augmente (r=-0,181, p =0,03), lorsque la durée d'AP légère augmente (r =- 0,212, p =0,012), et la durée de la vigoureuse augmente (r = -0,169, p= 0,04).

c) Sommeil profond et très profond

Plus l'efficacité du sommeil augmente, plus les durées de sommeil profond (r = 0,335, p < 0,001), et très profond augmentent (r = 0, 198, p = 0, 01).

On observe une diminution de la durée de sommeil profond lorsque la dépense énergétique totale (r=-0,240, p = 0,04), et active (r = -0,263, p = 0,02) de la journée augmente, ainsi que lorsque le nombre de pas par jour augmente (r= -0,288, p = 0,001).

Concernant les variables de terrain, plus l'altitude de la nuit augmente, plus la proportion de sommeil profond augmente (r = 0,404 ; p= 0,05). L'augmentation de dénivelé global est corrélée avec le temps de sommeil profond (r=0,170, p=0 ,041).

4. *Fragmentation du sommeil*

La durée moyenne de sommeil léger en altitude est de 329 minutes, avec un écart type de 70 min. Cela représente 33 minutes de plus qu'en plaine, où la durée moyenne est de 296 minutes avec un écart type à 82. Cette différence est statistiquement significative (p = 0,002).

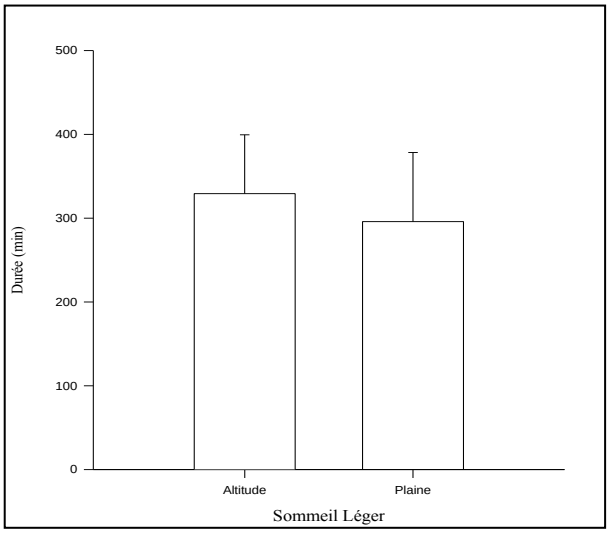
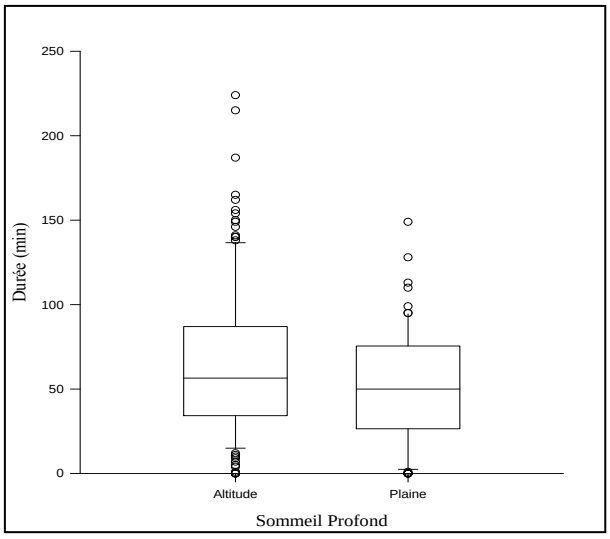


Figure 12 : Durée du sommeil léger en minutes en altitude et en plaine

Il existe aussi une tendance à ce que la durée du sommeil profond soit un peu plus élevée à 56 min [34-87] en altitude, versus 50 [26-75] en plaine (p = 0,09).

Figure 13 : Durée du sommeil profond en minutes en altitude et en plaine



Il n'y a en revanche pas de différence significative en ce qui concerne les durées de sommeil très profond et de veille intra- sommeil entre l'altitude et la plaine.

	Altitude	Plaine	p-value
Sommeil très profond (min)	16,5 [8-34]	21 [9-35]	0,9
Veille intra-sommeil (min)	26 [9-56]	28 [0-76]	0,7

Tableau 4: durée du sommeil très profond et de veille intra-sommeil (en minutes) en altitude et en plaine. Les résultats sont présentés sous forme de médiane encadrée du 1er et 3ème quartile pour l'ensemble des sujets

Si on restreint l'analyse en comparant les nuits passées en haute altitude soit à plus de 3 500 m, on s'aperçoit que la durée du sommeil profond est plus longue de 6 minutes par rapport à la plaine (p = 0,01).

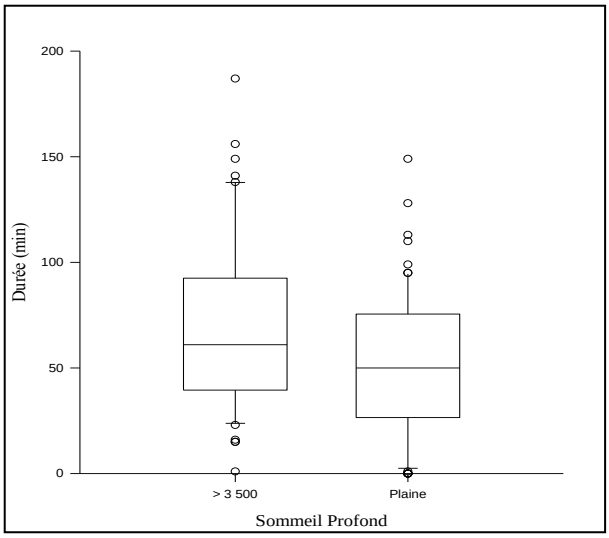


Figure 14 : Durée du sommeil profond en minutes à plus de 3 500 m et en plaine. Les résultats sont présentés sous forme de médiane encadrée du 1er et 3ème quartile pour l'ensemble des sujets

Le sommeil léger est aussi augmenté de 40 min à plus de 3 500 m par rapport à la plaine avec une différence statistiquement significative (p= 0,004).

	>3 500 m	Plaine	p
Sommeil léger (min)	336 [291-383]	296 [231-351]	0,004
Sommeil profond (min)	61 [39-92]	50 [26-75]	0,01
Sommeil très profond (min)	17 [9-34]	21 [9-35]	0,9
Veille intra-sommeil (min)	26 [4,7-61]	28 [0-76]	0,7

Tableau 5 : répartition des durées de sommeil dans les différents stades (en minutes) à plus de 3 500m et en plaine. Les résultats sont présentés sous forme de médiane encadrée du 1er et 3ème quartile

IV. Discussion

A. Evaluation de la validité du SWA dans la mesure des données de dépense énergétique au cours des trails en haute altitude

1. Comparaison à la plaine

L'enregistrement des traileurs en plaine, par le même actimètre permet une comparaison des données de trail à celles de vie habituelle. Avec un nombre de pas moyen de 8 489, les participants font partie de la population active.

Les variables de dépenses énergétiques au cours des trails vont dans le même sens. L'AMT a des variables plus élevés de distance parcourue par jour, de nombre de pas réalisés, de dépense énergétique… Si la proportion n'est pas strictement identique, cela peut être lié au fait que la dépense énergétique active ne prend en compte que les activités supérieures à 3 METS, correspondant à de la marche d'un pas vif. Le nombre de pas ne reflète pas complètement la différence d'effort physique.

En ce qui concernent les répartitions d'activités physiques, les traileurs passent environ 5h de plus en AP d'intensité modérée, 1h15 de plus en vigoureuse, et 3h de moins en AP légère, par rapport à la plaine.

La comparaison des résultats des enregistrements obtenus en plaine et en altitude donne des informations cohérentes. Le SWA semble fiable pour évaluer les données liées à la dépense énergétique au cours des trails.

2. Comparaison aux données de la littérature

L'étude de référence (28) étudiant la dépense énergétique lors de l'ascension du mont Everest par la technique de l'eau doublement marquée de Pulfer a retrouvé une dépense énergétique mesurée à une altitude comprise entre 5 900 et 8 046m, de 4 636 kcal par jour.

Un seul article relatant le travail de l'équipe de Miller (29), paru en 2013 donne des informations descriptives sur le niveau de dépense énergétique au cours d'un trail de 15 jours en haute altitude (6 170 m) au Pakistan. 12 hommes et 2 femmes ont porté un actimètre ; ils ont effectué une ascension progressive de 15 jours à une altitude maximale de 6 170m et un séjour de 11 jours à plus de 3 000 m.

La dépense énergétique totale a été de 4 173 kcal [3 332-4 838]. Ils ont fait en moyenne 26 232 pas/j [11 788-34 979]. Ces valeurs sont cohérentes avec celles que nous avons obtenues dans nos trails, puisque l'ESR a une dépense énergétique totale médiane de 3 885 kcal [3 582-4 286], l'AMT 4 338 kcal [3 694-5 002].

Sur l'ensemble du trail de l'ESR, la podométrie médiane est de 36 472 pas/j [29 332 - 41 683] et de 48 218 [42 355-58 743] pour l'AMT. Ces valeurs sont supérieures au 26 232 pas/j moyen réalisé lors du trail de Miller [11 788- 34 979]. La durée de l'AP au moins modérée est de 7 h/j au Pakistan versus 9 h/j en moyenne sur nos 2 trails. Ils passent en AP modérée 6h 39min par jour versus 7h 23 pendant nos 2 trails, 1h en vigoureuse versus 1h 30, et 3 minutes en très vigoureux versus 16 min.

Si les parcours diffèrent dans les 3 trails, les niveaux de dépense énergétique restent dans une fourchette comparable. Notre étude a donc retrouvé des données cohérentes. Le SWA semble adapté à la mesure de la dépense énergétique lors de trails en haute altitude.

B. Evaluation de la validité du SWA dans la mesure des données de sommeil au cours des trails en haute altitude

1. Efficacité et temps de sommeil

Différentes études ont validé l'utilisation de l'actimètre afin d'évaluer l'efficacité du sommeil et le temps total de sommeil (26, 27). Si l'efficacité du sommeil en altitude et en plaine est superposable (87%), la durée allongée et le temps total de sommeil est significativement plus important en altitude au cours de notre étude. Les traileurs dorment environ 1 h de plus en haute altitude par rapport à la plaine.

2. Le SWA à l'épreuve de la détection des différents stades de sommeil

a) Sommeil léger

Nous avons trouvé que le sommeil léger était significativement plus élevé à plus de 3 500 m, par rapport à la plaine. C'est cohérent avec l'étude de Johnson en 2010 qui avait montré que le temps total de stade N1 augmente à partir de 3 500 m. En revanche, cette durée supérieure de sommeil léger par rapport à la plaine est aussi retrouvée si l'on compare l'ensemble des nuits du trail à la plaine. L'altitude moyenne des nuits au cours des trails était à 2 519 m ; l'article de Johnson retrouve une augmentation de la durée du sommeil léger à partir de 3 500 m, non retrouvée à 1 400 m, mais aucun enregistrement n'a été réalisé entre 1 400 et 3 500. On peut donc supposer qu'il existe une augmentation du temps de sommeil léger en altitude dès 2 500 m.

b) Sommeil profond

En ce qui concerne le sommeil profond, nous avons observé une durée semblable entre la plaine et les trails, mais une durée plus longue lorsque l'altitude était supérieure à 3 500 m. Cela contraste avec les résultats de Lashtang et Stadelman qui avaient mis en évidence une baisse de la proportion du sommeil profond (stade 3 et 4) au dessus de 1 650 m. Reite l'avait mis en évidence pour une altitude de 4 300 m.

c) Sommeil paradoxal

De même que Johnson l'a observé en 2010, le sommeil paradoxal (correspondant au très profond) est globalement conservé en haute altitude.

3. Hypothèses explicatives

La première hypothèse pour expliquer les modifications du sommeil en haute altitude est le fait que les traileurs ont une activité physique importante. Cet impact sur le sommeil a été étudié par comparaison d'enregistrements polysomnographiques de sujets ayant une AP avec ceux de sujets témoins sédentaires. La méta-analyse publiée en 1997 de Youngsted conclue ainsi que l'AP entraine une petite augmentation du temps de sommeil total (+ 10 min), du sommeil profond (+ 1,6 minutes), et une diminution du temps de sommeil paradoxal de 6 minutes. Il n'y aurait pas de différences en fonction de son intensité ; en d'autres termes, un exercice physique léger, modéré ou intense a le même impact sur le sommeil. Les augmentations retrouvées dans l'étude du temps de sommeil total et du sommeil profond sont respectivement beaucoup plus importantes, et plus importantes ; même si les trails

représentent un niveau d'AP particulier, les modifications du sommeil ne sont probablement pas expliquées seulement par l'AP.

L'autre hypothèse est que le SWA est peu fiable en ce qui concerne la détection des différents stades de sommeil. En effet, si on s'intéresse en détail aux nuits en plaine, elles sont composées à 75% de sommeil léger, le sommeil profond est de 50 minutes, et un sommeil paradoxal à 5%. Pour mémoire, une nuit normale d'un adulte est composée de 100 minutes de sommeil profond, 50% de léger, et 20% de paradoxal. La veille intra-sommeil est à 5%, ce qui correspond au pourcentage classique. Il existe donc une surestimation du sommeil léger aux dépens du profond et du très profond. On note néanmoins des durées de sommeil homogènes dans les différents stades entre la plaine et l'altitude. L'augmentation de sommeil léger en altitude objectivée par le SWA semble donc réelle, d'autant plus qu'elle est cohérente avec la littérature. En ce qui concerne l'augmentation du sommeil profond à partir de 3 500 m, il est possible qu'elle soit retrouvée ici par un défaut de précision du SWA. Claire Codroch dans sa thèse de médecine (30) a comparé des enregistrements polysomnographiques aux enregistrements du SWA chez des patients diabétiques. Le SWA, en détectant certaines périodes de veille comme du sommeil, surestime le sommeil léger et le sommeil profond. En revanche, il n'y avait pas de différence significative sur la mesure du sommeil paradoxal. Ceci s'explique par le fait que le sommeil paradoxal est une phase spécifique pendant laquelle il existe une accélération de la fréquence cardiaque, de la fréquence respiratoire, une abolition du tonus musculaire et une absence de thermorégulation ; l'ensemble de ces paramètres permet probablement au SWA de différencier cette phase de sommeil des autres.

C. Données du terrain

Lorsque l'on cherche à évaluer la difficulté d'un parcours en montagne, on se base sur 2 données de terrain : le nombre de kilomètres à parcourir, et le dénivelé.

Les analyses effectuées au cours de cette étude ont permis de mettre en évidence que la variable de terrain qui a le plus d'impact sur les données d'AP est la distance parcourue. En revanche, il n'a pas été retrouvé de corrélations significatives notables entre les dénivelés et les données actimétriques de dépense énergétique.

Une des personnes a participé aux 2 trails. L'ESR a été perçu comme plus physique. Ce ressenti était surprenant, puisque les valeurs médianes de dépense énergétique et de podométrie sont plus élevées au cours de l'AMT, ce qui témoigne d'un coût énergétique plus important. Il n'y avait pas de différence significative entre les dénivelés cumulés, positif et négatif des 2 trails. On s'est donc intéressé à l'analyse des données en séparant les journées où le dénivelé global était positif des journées où le dénivelé global était négatif ; cela a permis de retrouver des paramètres de dépenses énergétiques supérieures lorsque le dénivelé global était négatif. Au cours de l'ESR, les traileurs ont eu 5 journées avec un dénivelé global négatif versus 4 pour l'AMT, et 4 de ces journées se succèdent (de J4 à J7). Cependant, une hypothèse pour expliquer ce résultat est que le SWA est réputé pour détecter avec une moins bonne précision les mouvements lents, de faible amplitude (18). La montée est exigeante sur le plan cardiovasculaire ; les traileurs vont plus lentement. La descente est contraignante sur le plan bio-mécanique, mais les foulées sont plus rapides, la vitesse plus élevée. Il est probable que le SWA par la conversion des modifications de vitesse en DEA sous estime le niveau de DEA engendré par les journées avec dénivelé cumulé positif.

Dans la mesure où la validité scientifique du SWA pour détecter les stades de sommeil ne semble pas acquise, nous ne reprenons pas dans la discussion l'impact des variables de terrain sur les données sommeil.

D. Limites de l'étude

1. Partie descriptive

Un premier point fort de cette étude est la population sur laquelle elle porte. Les quatorze traileurs, ont un profil similaire ; ce sont des sportifs amateurs, passionnés de montagne, avec une expérience antérieure de haute altitude. Néanmoins il y avait plus d'hommes (11) que de femmes (5).

Les deux trails ont été organisés par la même association, qui a à cœur de proposer un vrai défi sportif, restant néanmoins accessible pour des personnes en bonne forme physique.

Concernant l'étude de l'activité physique, ce travail permet d'obtenir des données objectives de dépense énergétique, avec l'outil performant que représente le SWA.

L'une des limites concernant le sommeil est la variabilité importante inter-individuelle. On n'a pas tous la même qualité de sommeil, ni les mêmes phénotypes (petits versus gros dormeurs), chronotype (tendance à avance ou retard de phase).

2. Partie analytique

La limite principale de cette étude concerne la partie analytique. Comme les variables influent de manière conjointe sur une donnée, on n'a pas assez de données pour évaluer l'action de chacune des variables. Par exemple, lors des analyses de corrélation, la DEA est corrélée à la distance parcourue ; on n'a pas trouvé de corrélation significative entre DEA et dénivelé. Cependant, il est évident que le dénivelé influe sur la DEA. L'analyse de comparaison entre DEA des journées avec un dénivelé positif versus négatif retrouve une différence significative. Ainsi, nos analyses de corrélations sont probablement limitées par le faible nombre de données. Ce problème reste structurel à ce type d'études qui ont lieu « sur le terrain ».

E. Les objets connectés : une perspective d'avenir ?

De nombreuses études ont utilisé l'actimètre pour évaluer la dépense énergétique, le nombre de pas réalisés par jour, le niveau d'intensité physique et l'efficacité du sommeil chez différents sujets (adolescents, diabétiques, insuffisants respiratoire chronique...). Aujourd'hui, se développent des objets connectés, qui permettent d'évaluer les mêmes paramètres, disponible dans le commerce. Leur objectif est d'améliorer l'état de santé du sujet en évaluant l'AP. Ils ont l'avantage d'être directement connecté au smartphone ce qui permet d'obtenir les résultats en temps réel. Ils sont aussi plus discrets, et d'un design plus moderne que le SWA. Une étude de Ferguson (31) comparant sept objets au SWA a trouvé une bonne corrélation ($r > 0,8$) dans l'estimation du nombre de pas par jour, et une corrélation moyenne de la DET ($r = 0,74$). La qualité de ces objets est dépendante de l'algorithme qui les compose ; celui de la marche est adéquat.

En terme de mesure du sommeil, ces outils surestiment le temps total de sommeil. Par

exemple, le Jawbone évalue le TTS à 26 minutes de plus chez une population de femmes d'âge moyen (32), 10 minutes chez des adolescents en bonne santé (33) en comparaison à la polysomnographie. Le fitbit dans l'étude de Montgomery-Downs (34) surestime le TST de 24 min par rapport au SWA et de 67 min par rapport à la polysomnographie, chez 24 adultes en bonne santé.

Ces objets connectés peuvent de manière acceptable être utilisés par les consommateurs pour leur intérêt personnel, mais doivent bénéficier d'études complémentaires pour valider leur utilisation dans l'étude du sommeil chez différentes populations de patients.

Conclusion

Ce travail original a permis de connaître le niveau d'intensité physique atteint lors de trails en haute altitude, au moyen d'un outil fiable et simple d'utilisation dans un environnement exigeant que représente la haute altitude. Par la comparaison avec les données en plaine, on sait aujourd'hui qu'un trail d'une dizaine de jours en haute altitude représente un effort 4 fois plus important de dépense énergétique que celle des conditions habituelles, chez les personnes considérées comme « actives ». Il s'agit essentiellement d'AP d'endurance, avec de longues phases d'activité d'intensité modérée. Ainsi, les médecins du sport peuvent conseiller les futurs traileurs sur la préparation physique que nécessite la pratique de cette activité, et limiter les risques liés à un manque d'entrainement.

La distance parcourue est la donnée du terrain qui impacte le plus la dépense énergétique. Ce travail apporte aussi une information nouvelle sur l'impact du dénivelé cumulé négatif, nécessitant une dépense énergétique active plus importante qu'en montée.

Concernant le sommeil, on a observé une augmentation de plus d'une heure du temps de sommeil total en haute altitude, alors que le potentiel facteur confondant que représente l'activité physique ne semble l'augmenter que d'une dizaine de minutes. L'augmentation du stade léger est probablement plus précoce que celle objectivée dans la littérature. Néanmoins, ces résultats sont à confirmer par des études complémentaires, notamment avec un outil autre que le SWA qui n'est pas assez sensible pour détecter les différentes phases de sommeil. Les objets connectés ne semblent aujourd'hui pas pouvoir le suppléer. Les obstacles sont essentiellement liés aux nombres de paramètres (EEG, électromyogramme, électro-occulogramme) nécessaires à classifier les stades du sommeil. D'ici quelques années, l'évolution de la technologie permettra probablement de contourner ces obstacles. Le sommeil pourra alors être étudié de manière simple, dans des environnements extrêmes comme celui de la haute altitude.

Bibliographie

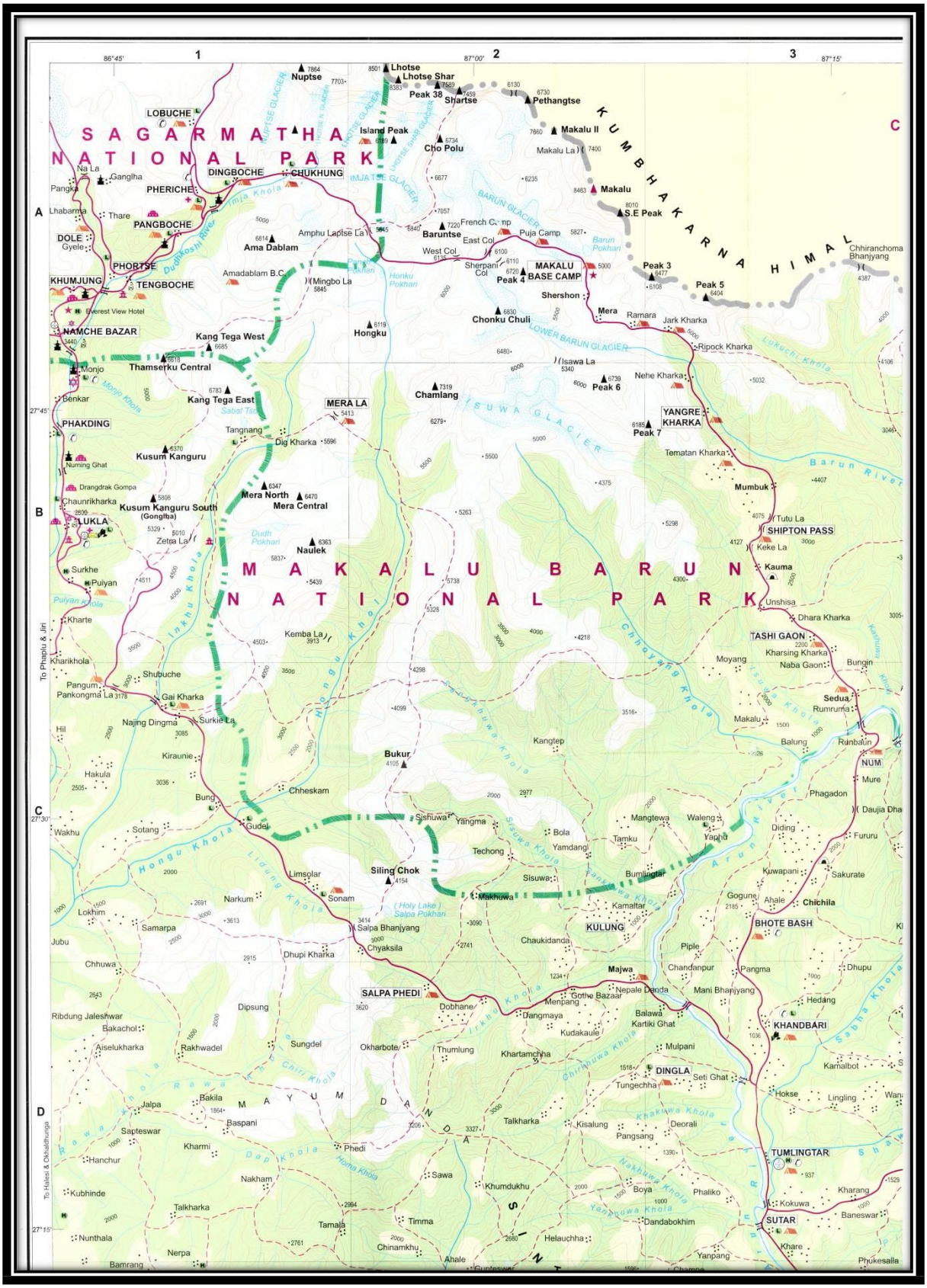
(1) https://fr.wikipedia.org/wiki/Altitude
(2) Barry PW, Pollard AJ. Altitude illness. (2003) *BMJ : British Medical Journal* 326(7395):915-919.
(3) San T., Polat S., Cingi C., Eskiizmir G., Oghan F., Cakir B. (2013). Effects of High Altitude on Sleep and Respiratory System and Theirs Adaptations. *The Scientific World Journal*, 241569.
(4) Richalet JP, Herry J.P. *Médecine de l'alpinisme et des sports de montagne*, (2006) 4e ed. Paris Masson
(5) Bärtsch, P., Swenson, E.R. Clinical practice: acute high-altitude illnesses (2013) *New England Journal of Medicine* 368: 2294–2302
(6) John B.West, Robert B. Schoene, Andrew M. Luks and James S. Milledge *High altitude medecine and physiology* (2013) Fifth edition. CRC Press
(7) Pawson I.G. , Jest C. (1978) The high-altitude areas of the world and their cultures. P.T. Baker (ED.) *The biology of high-altitude peoples* (17-45) Cambridge : Cambridge University Press
(8) Richalet JP (1990) The heart and adrenergic system in hypoxia. *Hypoxia. The adapatations* ED BC Decker Inc., Toronto, Philadelphhia, 231-240
(9) Rose M. S., Houston C. S., Fulco C. S., Coates G., Sutton J. R., Cymerman A. (1988) Operation Everest. II: Nutrition and body composition *Journal of Applied Physiology* Vol. 65 no. 6, 2545-2551
(10) Boyer S. J., Blume F. D. (1984) Weight loss and changes in body composition at high altitude *Journal of Applied Physiology* Vol. 57 no. 5, 1580-1585
(11) https://fr.wikipedia.org/wiki/Trail
(12) Hultgren H.N., Marticorena E., (1978) High altitude pulomnary oedema. Epidemiologic observations in Peru *Chest* 74, 372-376
(13) Ainsworth B.E., Haskell W.L. and all. (2000) Compendium of physical activities : an update of activity codes and MET intensities *Medicine and Science in Sports and Exercice*; S498-S516
(14) A. Vuillemin (2009) Comment quantifier l'activité physique dans les maladies respiratoires et utiliser cette mesure en pratique quotidienne *La réhabilitation du malade respiratoire chronique* Chapitre 8, 151-161
(15) Schoeller, D.A. (1999). Recent advances from application of doubly labeled water to measurement of human energy expenditure. *J. Nutr. 129*, 1765–1768.
(16) Schoeller, D.A., and van Santen, E. (1982). Measurement of energy expenditure in humans by doubly labeled water method. *J. Appl. Physiol. 53*, 955–959.
(17) Chen, K.Y., and Bassett, D.R. (2005). The Technology of Accelerometry-Based Activity Monitors: Current and Future *Medicine and Science in Sports and Exercice 37*, S490–S500.
(18) Andrew P. Hills, Najat Mokhtar, Nuala M. Byrne (2014) Assessment of physical activity and energy expendure : an overview of objective measurs *Font. Nutr.* http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnut.2014.00005/full
(19) Joern A.T, Shurley J.T., Brooks R.E., Guenter C.A., and Pierce C.M., (1970). Short-term changes in sleep patterns on arrival at the South Polar Plateau. *Archives of Internal Medicine*, vol. 125, no.4, pp. 649–654, 1970.
(20) Johnson, P.L., Edwards, N., Burgess, K.R., and Sullivan, C.E. (2010). Sleep architecture changes during a trek from 1400 to 5000 m in the Nepal Himalaya. *J. Sleep Res. 19*, 148–156.
(21) Latshang, T.D., Lo Cascio, C.M., Stöwhas, A.-C., Grimm, M., Stadelmann, K., Tesler, N., Achermann, P., Huber, R., Kohler, M., and Bloch, K.E. (2013). Are nocturnal breathing, sleep, and cognitive performance impaired at moderate altitude (1,630-2,590 m)? *Sleep 36*, 1969–1976.
(22) Stadelmann, K., Latshang, T.D., Lo Cascio, C.M., Tesler, N., Stoewhas, A.-C., Kohler, M., Bloch, K.E., Huber, R., and Achermann, P. (2013). Quantitative changes in the sleep EEG at moderate altitude (1630 m and 2590 m). *PloS One 8*, e76945.
(23) Anholm, J.D., Powles, A.C., Downey, R., Houston, C.S., Sutton, J.R., Bonnet, M.H., and Cymerman, A. (1992). Operation Everest II: arterial oxygen saturation and sleep at extreme simulated altitude. *Am. Rev. Respir.* Dis. *145*, 817–826.
(24) Shogilev, D.J., Tanner, J.B., Chang, Y., and Harris, N.S. (2015). Periodic Breathing and Behavioral Awakenings at High Altitude. Sleep Disord. 279263.
(25) Reite, M., Jackson, D., Cahoon, R.L., and Weil, J.V. (1975). Sleep physiology at high altitude. Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. *38*, 463–471.
(26) Nussbaumer-Ochsner, Y., Schuepfer, N., Siebenmann, C., Maggiorini, M., and Bloch, K.E. (2011). High altitude sleep disturbances monitored by actigraphy and polysomnography. *High Alt. Med. Biol. 12*, 229–236.
(27) Latshang, T.D., Mueller, D.J., Lo Cascio, C.M., Stöwhas, A.-C., Stadelmann, K., Tesler, N., Achermann, P., Huber, R., Kohler, M., and Bloch, K.E. (2016). Actigraphy of Wrist and Ankle for Measuring Sleep Duration in Altitude Travelers. *High Alt. Med. Biol*.
(28) Pulfrey SM, Jones PJ. Energy expenditure and requirement while climbing above 6,000 m (1 1996) *J Appl Physiol* Sep;81(3):1306-11.

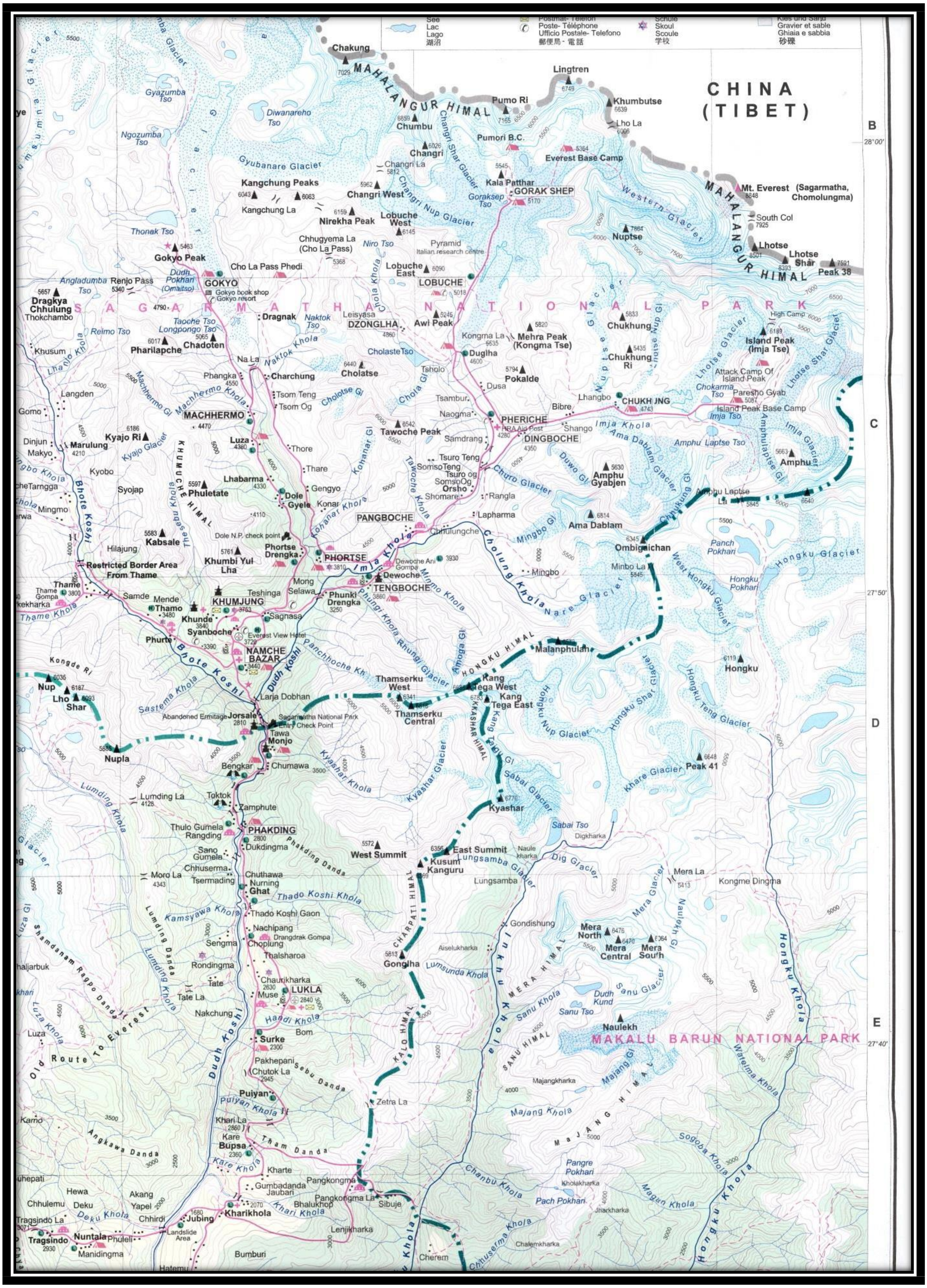
(29) Miller Andrew D., Taylor Bryan J., Johnson Bruce D. (2013) Energy Expenditure and Intensity Levels During a 6170-m Summit in the Karakoram Mountains. The Division of Cardiovascular Diseases, Department of Medicine,Mayo Clinic, Rochester, MN
(30) Claire Cordroc'H (2016) Evaluation ambulatoire du sommeil du patient diabétique de type 2 : validité du SenseWear Pro Armband 3 *Médecine humaine et pathologie*
(31) Ferguson T, Rowlands A, Olds (2015) T. The validity of consumer-level, activity monitors in healthy adults worn in free-living conditions: a cross-sectional study. *Int J Beahv Nutr Phys Act.* 12- 42.
(32) Zambotti M, Claudatos S, Inkelis S. (2015) Evaluation of a consumer fitness-tracking device to assess sleep in adults. *Chronobiol Int*. 32(7):1024- 8.
(33) Zambotti M, Baker F, Colrain I. (2015) Validation of Sleep-Tracking Technology Compared with Polysomnography in Adolescents. *Sleep.* 38(9):1461- 8.
(34) Montgomery-Downs HE, Insana SP, Bond JA. (2012) Movement toward a novel activity monitoring device. *Sleep Breath.* 16(3):913–7

Annexes

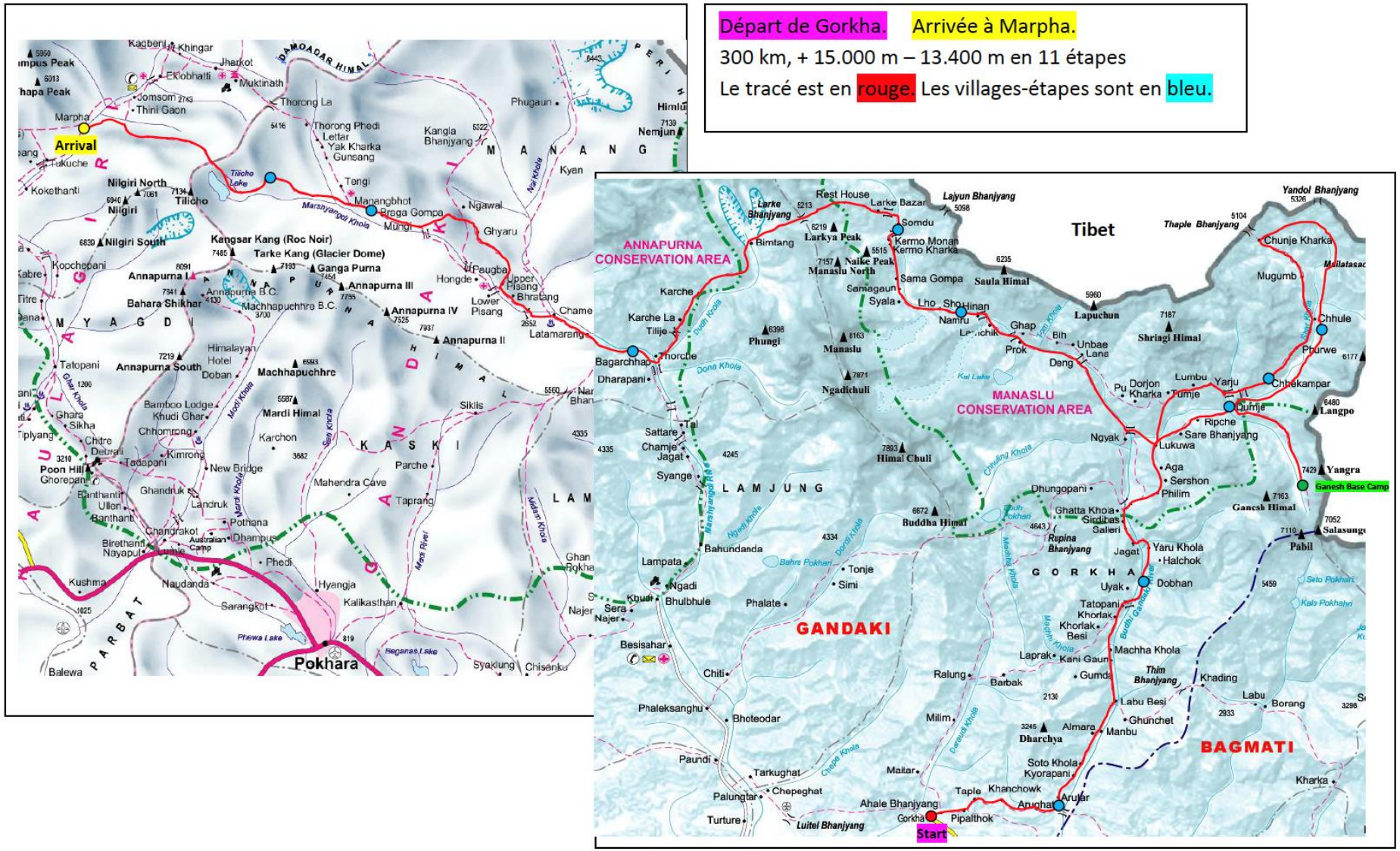
Annexe 1 : rapport PDF obtenu à partir d'un enregistrement du SWA

Annexe 2 : carte de l'Everest Sky Race (zone Makalu et zone Everest)




CHINA (TIBET)
MAHALANGUR HIMAL
SAGARMATHA NATIONAL PARK
MAKALU BARUN NATIONAL PARK
Mt. Everest (Sagarmatha, Chomolungma)
Everest Base Camp
GORAK SHEP
Kala Patthar
Pumo Ri
Lingtren
Khumbutse
Lho La
Lhotse
Lhotse Shar
Nuptse
LOBUCHE
GOKYO
Gokyo Peak
DZONGLHA
Cho La Pass Phedi
PHERICHE
DINGBOCHE
CHUKHUNG
Island Peak (Imja Tse)
Ama Dablam
PANGBOCHE
TENGBOCHE
PHORTSE
KHUMJUNG
Khunde
Syanboche
NAMCHE BAZAR
Thame
Jorsale
Monjo
PHAKDING
LUKLA
Surke
Puiyan
Bupsa
Kharikhola
Jubing
Nuntala
Tragsindo
Dudh Koshi
Bhote Koshi
Imja Khola
Mera Peak
Naulekh
Kusum Kanguru
Thamserku
Kang Tega
Hongku
Malanphulan
Kyashar
Old Route To Everest

Annexe 3 : carte de l'Annapurna Mandala Trail



Forquenot de La Fortelle Sophie

Exploration des données actimétriques de jour et de nuit au cours de trails en haute altitude

RESUME

Contexte : Peu de données existent sur l'évaluation de l'activité physique (AP) et du sommeil en condition réelle de trail en haute altitude.

Méthodes : Un recueil de données a été réalisé à partir de l'actimètre multicapteurs Sensewear® Pro3 Armband (SWA) sur toute la durée de 2 trails distincts menés en Himalaya: l'Everest Sky Race (ESR) du 1er au 13/11/2015 et l'Annapurna Mandala Trail (AMT) du 4 au 14/04/2016, puis à 1 mois du retour en plaine. Six enregistrements effectués sur 7 volontaires bénévoles ont été validés sur l'ESR, et 8 sur l'AMT.

Résultats : Les traileurs de l'ESR font en moyenne 10km/j de moins que ceux de l'AMT. Le reste des données de terrain sont comparables. La dépense énergétique totale médiane de l'ESR est de 3 885 kcal/j [3 582 - 4 286], soit plus petite que celle de l'AMT qui est de 4 338 kcal/j [3 694 – 5 002] (p = 0,001), tout comme la dépense énergétique active (DEA) médiane de 2 785 kcal/j [2 294 - 3 227] versus 3 348 kcal/j [2 715 - 3 781] (p =0,001), et la podométrie de 36 472 pas/j [29 332 - 41 683] versus 48 218/j [42 355 - 58 743] ($p<10^{-3}$) respectivement. Lors d'une journée de trail, sur l'ensemble des 2 trails, les participants ont essentiellement une AP d'intensité modérée (7h23 ± 2h43). Les temps passés en activité vigoureuse et très vigoureuse sont respectivement de 1h30 ± 1h22, et de 16 ± 32 min. Ils consacrent 2h14 ± 1h10 à une AP légère. Plus la distance est grande, plus la DEA est élevée (r = 0,707 ; p < 0,05). Plus le dénivelé cumulé augmente plus le nombre de pas augmente (r = 0, 463 ; p = 0,02). L'efficacité du sommeil en altitude est de 87% [79-91], identique à celle en plaine de 86% [78-92]. On observe cependant que les traileurs dorment 50 minutes de plus en valeur médiane, soit 437 min [388 - 493] versus 387 min [308 - 444] (p = 0,001) lorsqu'ils sont en plaine. Ceci concernant notamment le sommeil léger avec 33 minutes de plus qu'en plaine (p = 0,002). Il existe une tendance à ce que l'architecture du sommeil soit modifiée, avec une durée de sommeil profond un peu plus élevée à 56 min [34 - 87] en altitude versus 50 [26 -75] en plaine (p = 0,09). Si l'on s'intéresse à l'impact des données du terrain, plus l'altitude de la nuit augmente, plus la proportion de sommeil profond augmente (r = 0,404 ; p = 0,0 5). En comparant la podométrie de chacun des trails à celle de la plaine qui est de 8 489 pas/j [5 350 –14 543], on constate que les participants de l'ESR ont marché 4 fois plus, et les participants de l'AMT 6 fois plus que d'habitude. La DEA de l'ESR est 3,5 fois supérieure, et pour l'AMT de 4,2 fois supérieure à celle habituelle. Les traileurs de l'AMT ont eu une DEA de 20% supérieure à ceux de l'ESR. Comparativement à l'activité en plaine, les traileurs passent environ 5h de plus en AP d'intensité modérée, 1h15 de plus en vigoureuse, et 3h de moins en AP légère, par rapport à la plaine. Concernant le sommeil, ces résultats contrastent avec les modifications classiquement rapportées du sommeil en haute altitude. Le SWA étant validé pour l'évaluation de l'efficacité du sommeil et le temps de sommeil total, l'augmentation de ces paramètres lors des trails est probablement la conséquence du niveau de l'AP journalière atteinte.

Conclusion : La comparaison des résultats des enregistrements obtenus en plaine et en altitude donne des informations cohérentes avec les données de terrain. Le SWA est utile pour évaluer objectivement les données de l'activité physique au cours des trails. Néanmoins, les données concernant l'architecture du sommeil en haute altitude demandent à être confirmées par des approches plus conventionnelles.

MOTS-CLES

Trail, haute altitude, dépense énergétique, sommeil

Vu, le Président du Jury,
(tampon et signature)

Professeur François-Xavier Blanc

Vu, le Directeur de Thèse,
(tampon et signature)

Dr Arnaud Chambellan

Vu, le Doyen de la Faculté,

Professeur Pascal JOLLIET