



**Diplôme d'Université
Trail Running**

**Influence de la charge additionnelle sur la
course à plat et en montée :**

**Présenté par
Mathieu Ivan**

**Sous la direction de
Ehrström Sabine**

Promotion 2023

Résumé :

Notre objectif au travers de ce mémoire a été d'étudier l'influence de la charge imposée par le transport de sac à dos sur le déplacement dans la discipline du trail running. Après avoir fait ressortir les différents facteurs de performances physiologiques en trail nous nous sommes intéressés à l'impact que pouvait avoir la charge additionnelle sur les variables en lien avec le coût énergétique du déplacement. L'originalité de notre étude est qu'elle visait à comparer l'influence de la charge additionnelle sur le coût énergétique et psychologique entre la course à plat et celle en côte. Notre hypothèse était que l'impact de la charge additionnelle serait plus important dans la condition de course avec déclivité car le corps est d'avantage amené à lutter contre la gravité. Pour cela nous avons fait courir 6 sujets sur tapis roulant à des vitesses de 10, 11,5 et 13km/h sur le plat et 6, 7 et 8 km/h à 10% d'inclinaison, sans sac et avec un sac lesté de 3kg. Les variables étudiées étaient la fréquence cardiaque et la perception de l'effort. Nos résultats ont montré une augmentation significative des valeurs de fréquences cardiaques et de perception de l'effort sous l'influence de la charge additionnelles sur les paliers les plus rapides dans les deux conditions. Cependant nous n'avons pas trouvé de différences significatives dans la comparaison de l'augmentation de la fréquence cardiaque et de perception de l'effort sous l'influence de la charge additionnelle entre les conditions à plat et en côte. Il nous paraîtrait intéressant de poursuivre ces recherches avec des moyens supplémentaires afin d'étudier les variations dans la consommation d'oxygène et le taux de lactate sanguin avec un échantillon de sujets plus important.

Remerciements :

Je tiens premièrement à remercier les sujets qui ont bien voulu donner de leur temps pour participer à mon protocole expérimental. Il s'agit de jeunes enseignant(e)s d'EPS récemment arrivé en région parisienne tout comme moi, merci les amis !

Ensuite je tiens à remercier la piscine de Gagny et son responsable Nicolas qui m'a assuré la gratuité de l'accès à l'espace fitness pour mes cobayes afin que je puisse réaliser mes tests sur leurs tapis de course.

Mes remerciements vont aussi à Laure et Caroline ainsi qu'à tous les intervenants du DU trail de Grenoble pour la qualité de la formation qu'ils nous ont proposé, ainsi qu'à Sabine ma tutrice de mémoire pour les retours qu'elle a pu me faire sur ma revue de littérature.

Enfin je souhaite remercier tous les étudiants du DU trail pour leur bonne humeur et les moments de convivialité qu'on a pu passer ensemble durant les modules de formations.

Sommaire

Résumé :	2
Remerciements :	3
Introduction :	6
I) Analyse de la littérature :	7
1) Facteurs de performances en trail :	7
1.1) La puissance maximale soutenue :	7
1.1.1) La consommation maximale d'oxygène ou VO ₂ max :	8
1.1.1.a) La fréquence cardiaque maximale ou FC max :	8
1.1.1.b) Evolution de la VO ₂ à l'effort :	9
1.1.2) Les seuils métaboliques :	10
1.1.2.a) La fraction de VO ₂ maintenue :	10
1.1.2.b) Indice d'endurance :	10
1.2) Cout énergétique de la course :	11
1.2.1) Coût énergétique selon la déclivité :	12
1.2.2) L'économie de course :	13
1.2.2.a) Economie de course à plat :	14
1.2.2.b) Economie de course en montée :	14
2) La charge additionnelle en trail :	15
2.1) Impact de la charge additionnelle sur les réponses physiologiques lors de la course :	15
2.2) Impact de la charge additionnelle sur la marche :	16
2.3) Impact de l'augmentation de la masse sans modification du poids :	17
2.4) Impact de la charge additionnelle sur les variables physiologiques en montée :	18
2.5) Impact de la localisation de la charge additionnelle :	18
3) Problématique :	20
II) Méthodologie :	22
1) Participants :	22
2) Protocole :	22
3) Mesures :	23
4) Analyse :	24
III) Résultats :	25
1) Influence de la variation de la vitesse de course :	25
1.1) Variation de la vitesse de course à plat :	25
1.1.1) Influence sur la fréquence cardiaque :	25
1.1.2) Influence sur la perception de l'effort :	25
1.2) Variation de la vitesse de course en côte :	26

1.2.1) Influence sur la fréquence cardiaque :.....	26
1.2.2) Influence sur la perception de l'effort :.....	27
2) Lien entre économie de course à plat et en montée :	27
3) Impact de la charge additionnelle sur le plat et en côte :.....	28
3.1) Impact de la charge additionnelle sur la course à plat :.....	28
3.1.1) Impact sur la fréquence cardiaque :.....	28
3.1.2) Impact sur la perception de l'effort :.....	29
3.2) Impact de la charge additionnelle sur la course en côte :.....	29
3.2.1) Impact sur la fréquence cardiaque :.....	29
3.2.2) Impact sur la perception de l'effort :.....	30
3.3) Comparaison de l'impact de la charge sur la course à plat et en côte :.....	31
3.3.1) Comparaison de la fréquence cardiaque :	31
3.3.2) Comparaison de la perception de l'effort :.....	32
IV) Discussion :.....	33
1) Analyse des résultats :.....	33
2) Limites :	35
3) Perspectives :.....	36
V) Conclusion :.....	38
Bibliographie :.....	39
Annexes :	43

Introduction :

Le trail est aujourd'hui défini par la FFA comme étant des courses pédestres en milieu naturel en grande majorité sur chemins. De manière plus globale le terme « trail » renvoi à un large éventail de pratiques qui diffèrent de par la typologie du terrain (distance, technicité, dénivelé, environnement), le type d'épreuve (course d'un jour, par étape, en équipe ..) mais aussi les raisons de pratiquer (balade loisir, compétition, expédition ..).

Si aujourd'hui la discipline s'adresse à un public de plus en plus large notamment par ses différentes modalités de pratiques (3668 épreuves recensées en France par la FFA en 2018), force est de constater que les enjeux de la discipline s'orientent de plus en plus vers la performance à haut niveau en lien avec la professionnalisation et la recherche d'optimisation de tous les facteurs de performances. Le trail running étant une discipline nouvelle et les modalités d'épreuves très variées, les pistes d'optimisation sont nombreuses et concernent différents domaines (préparation physique, préparation mentale, gestion de course, optimisation matérielle, nutrition ...).

L'enjeu de ce mémoire sera d'explorer un facteur directement en lien avec la performance en trail puisqu'il s'agit de l'impact qu'à la charge additionnelle liée au port du sac à dos sur la course à plat comparée à la course en montée. Cette étude se veut originale car elle concilie les travaux précédemment menés sur les différences au niveau des réponses physiologiques de la course sur différentes déclivités ainsi que l'impact de la charge additionnelle sur la performance en course à plat.

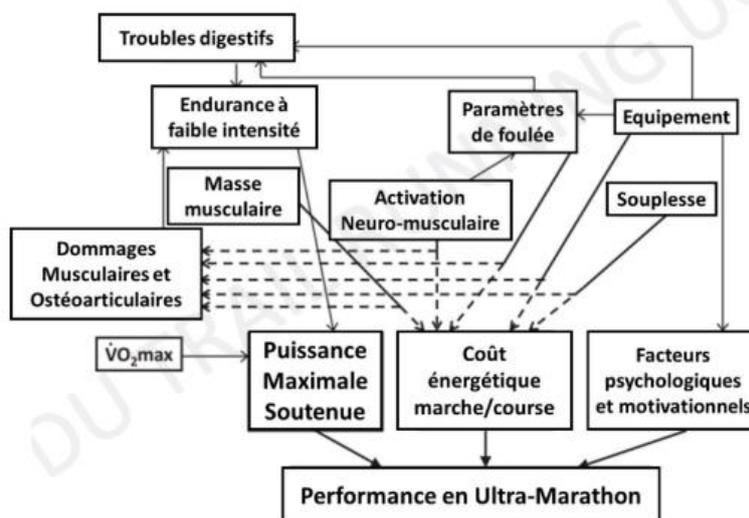
Dans une première partie de ce travail nous aborderons quels sont les différents facteurs de performances en trail running, ensuite nous analyserons quels sont les impacts réels et théoriques d'une charge additionnelle sur chacun de ces facteurs. Enfin nous proposerons un protocole expérimental fin d'étudier et de comparer l'impact de la charge additionnelle sur l'économie de course sur le plat et en montée.

1) Analyse de la littérature :

1) Facteurs de performances en trail :

Les profils de courses étant très variés en trail, allant du kilomètre vertical jusqu'au Tor des géants, les facteurs de performances sont nombreux et leur importance va varier selon le type de course auquel on va être confronté. Millet et al (2012) modélisent la performance en ultra marathon au travers d'un mélange de nombreux facteurs interdépendants. Nous pouvons faire ressortir de ce modèle 3 facteurs principaux de la performance qui sont : la puissance maximale soutenue, le coût énergétique du déplacement et les facteurs psychologiques et motivationnels. Au sein de ce mémoire nous nous intéresserons aux deux premiers facteurs en essayant de faire ressortir leurs composantes mais aussi comprendre en quoi les particularités de la discipline trail influence et est influencée par ces facteurs.

Figure 1 : Facteurs associés à la performance en ultra-marathon (Millet et al 2012):



1.1) La puissance maximale soutenue :

La puissance maximale soutenue correspond à la quantité d'énergie que le corps va être capable de produire sur un temps donné afin de maintenir un effort musculaire. Dans le trail, quel que soit le profil du parcours, la performance est essentiellement aérobie car les efforts sont longs. Un effort aérobie tel qu'on le caractérise provient du fait que la majeure partie de l'énergie produite pour réaliser la contraction musculaire (ATP) se fait via la filière énergétique

aérobie. Cette filière énergétique nécessite la captation, diffusion et utilisation de l'oxygène par le biais du système cardio-pulmonaire et des muscles, c'est ces systèmes qui vont influencer le plus la performance aérobie. En effet Lemire (2019) décrit la performance aérobie comme étant multi factorielle. Ce dernier fait ressortir l'importance de la VO₂max, des seuils métaboliques ainsi que du rendement énergétique. Nous allons à présent étudier chacun de ces facteurs afin de comprendre leur fonctionnement et leur implication dans la performance en trail.

1.1.1) La consommation maximale d'oxygène ou VO₂max :

La VO₂ max correspond à la quantité d'oxygène consommé par le corps par unité de temps. Exprimée en L/min ou en ml/min/kg, elle renvoi à la puissance du « moteur » de l'athlète dans sa capacité à régénérer l'ATP (adénosine triphosphate), énergie utilisée pour la contraction musculaire, par la filière énergétique aérobie.

Pastor et al, dans une méta-analyse réalisée en 2022 sur 54 sujets (21 femmes) participants à différentes courses de l'UTMB allant du format court (MCC 63km effort) au format long (UTMB 270km effort) ont cherché à identifier quels étaient les différents facteurs de performance selon la typologie de la course. Les résultats de cette étude montrent que la VO₂max est corrélée à la performance quel que soit la distance de course.

L'équation de Fick (1855) nous indique que la VO₂ max est le produit de la fréquence cardiaque maximale (FC_{max}), du volume d'éjection systolique maximal (VES_{max}) ainsi que la différence artérioveineuse de contenu en O₂ (CaO₂-CvO₂).

Equation 1 : Equation de Fick, 1855 :

$$\dot{V}O_{2max} = FC_{max} \cdot VES_{max} \cdot (CaO_2 - CvO_2)$$

Ici nous nous intéresserons seulement à la fréquence cardiaque car c'est une variable facile à exploiter et mesurer sur le terrain, inversement au VES et à la différence artério-veineuse en O₂ qui demandent du matériel plus spécifique voire médical.

1.1.1.a) La fréquence cardiaque maximale ou FC max :

Elle correspond à la fréquence cardiaque maximale que peut atteindre un individu. Elle s'atteint sur des efforts aérobie maximaux prolongés suffisamment longtemps (Ingjer, 1991).

La fréquence cardiaque est régulée par le biais des centres nerveux supérieurs et son augmentation est dépendante de l'activation du système nerveux sympathique. De manière empirique la formule d'Astrand (1954) permet de déterminer la valeur de sa FC max : $220 - \text{âge}$. D'autres formules existent mais le meilleur moyen de la déterminer reste de faire un test sur le terrain en étant muni d'un cardio-fréquence mètre.

Il est possible de déterminer une fréquence cardiaque de réserve ($FC \text{ réserve} = FC_{\text{max}} - FC \text{ repos}$) qui permet de mesurer, de manière approximative, l'intensité de l'effort. Par ailleurs la relation entre le pourcentage de FC réserve et pourcentage de VO_2 réserve serait linéaire (hors course en descente) ce qui permet sur le terrain, sans échangeur gazeux de mesurer les réponses physiologiques aux variations d'intensité (Swain & Leurholtz, 1997). Cependant certains auteurs mettent en avant que dans certaines conditions la fréquence cardiaque peut augmenter sans élévation de la demande énergétique (cas de la course en descente), notamment sur des efforts de longues durées (Mounier & al, 2003).

1.1.1.b) Evolution de la VO_2 à l'effort :

Lemire (2019) fait ressortir au sein de sa thèse que la VO_2 moyenne d'un sujet au repos serait d'environ 3,5 ml/Kg/min et que cette valeur serait amenée à être multipliée par 10-15 à l'effort maximale en raison des besoins liés à l'augmentation de l'activité des muscles squelettiques. La VO_2 max serait atteinte lors d'un test incrémental avec une augmentation progressive de la vitesse jusqu'à ce que le sujet ne puisse plus continuer et/ou que la VO_2 se stabilise à un plateau ((pas plus de 2,1 ml/kg/min sur un temps de 30s (Billat & Koralsztein, 1996)). La vitesse atteinte à VO_2 max ($vVO_2\text{max}$) que l'on peut assimiler à la vitesse maximale aérobie serait un bon prédicteur de la performance sur des trails de courte distance (Scheer 2019, Alvero-Cruz 2019) mais aussi sur de longues distances (Martinez-Navarro, 2020, trail de 107km).

A l'effort, en lien avec l'augmentation des paramètres physiologiques sous-jacents, la $VO_2\text{max}$ évolue linéairement avec l'intensité de l'effort ((Billat & Koralsztein, 1996). Toutefois l'augmentation de la VO_2 lors de l'effort dispose d'une certaine inertie appelée « cinétique de VO_2 » et qui se compose d'une phase rapide (<3mins) et d'une phase retardée (>3 mins jusqu'à la fin de l'effort). La cinétique de VO_2 étant dépendantes de l'intensité de l'effort, du temps et du niveau des sujets.

1.1.2) Les seuils métaboliques :

Les seuils métaboliques correspondent aux intensités auxquelles la plus forte sollicitation du système anaérobie va induire une accumulation des ions lactates plus importantes dans l'organisme. Assimilés aux seuils ventilatoires (SV) ou seuils lactiques (SL) (1 et 2), ils sont déterminables par le biais de test incrémentaux avec prise de lactate et/ou mesure des échanges gazeux respiratoires. Une étude menée par Scheer et al (2019) a montré que la vitesse à SV2 se révélait être un indicateur de performance sur un trail xs (31km) en parallèle de la VO₂max, la VMA et de l'économie de course à 12km/h. Ces seuils sont en lien avec la performance aérobie car ils vont déterminer la fraction de VO₂ que l'individu va pouvoir maintenir sur un effort d'une certaine durée.

1.1.2.a) La fraction de VO₂ maintenue :

Lemire (2019) met en avant le fait que la performance aérobie de deux individus avec des VO₂max équivalentes ne sera pas forcément la même car elle dépend aussi de l'intensité de fraction de VO₂max qu'ils sont capables de maintenir ainsi que son influence sur le temps de maintien (TLim) qui leur est propre. La relation entre l'intensité de l'exercice et le temps limite de maintien de cette intensité adopte une relation exponentielle décroissante. En lien avec les seuils métaboliques qui déterminent la capacité des muscles à produire l'énergie requise de manière aérobie, le temps limite à haute intensité (au-dessus du Seuil 2) diminuera beaucoup plus rapidement avec l'augmentation de l'intensité que ceux à basses intensité (en dessous du seuil 1).

1.1.2.b) Indice d'endurance :

Péronnet et Thibault (1987) ont défini un indice d'endurance prenant en compte la VMA, le % de VMA maintenu et le temps de course tel que $IE = (100 - \%VMA)/\ln(7/t)$. Un indice faible correspond à une meilleure endurance et donc à des athlètes capables de maintenir une fraction de VO₂ plus élevée avec l'augmentation du temps de course qu'un athlète avec un indice plus élevé. Si cet indice s'avère pertinent dans son utilisation en course sur route en prenant en compte la vitesse de course, dans le cadre du trail avec une vitesse qui fluctue énormément du fait de la typologie du terrain, il faut mesurer cet indice grâce aux valeurs de VO₂ ou de puissance qui sont plus difficiles à recueillir.

Néanmoins il est possible de déterminer un indice d'endurance sur une course de trail en utilisant la vitesse équivalente à plat en considérant que chaque 100m de dénivelé correspond à 1km d'effort supplémentaire à plat (Saugy & al, 2013). Il est nécessaire de prendre du recul par rapport à cet indice car ce dernier ne prend pas en compte l'environnement et la technicité du terrain.

1.2) Cout énergétique de la course :

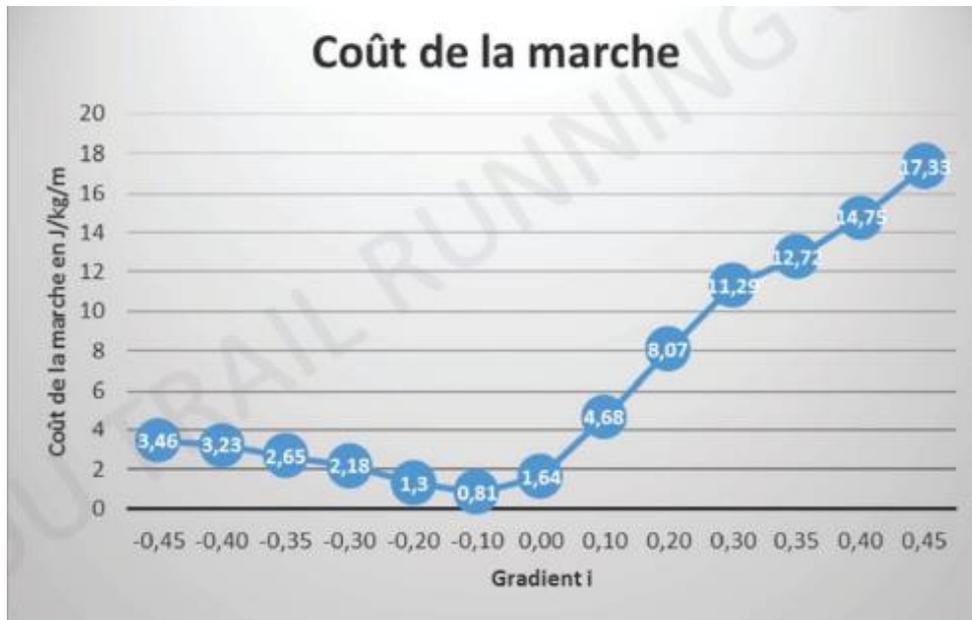
Le coût énergétique de la course correspond à la quantité d'énergie nécessaire pour déplacer une masse sur une distance donnée. Selon (Minetti et al 2002) le cout énergétique approximatif de la course à pied sur le plat serait égal à 1kcal/kg/km. Ces derniers ont modélisé le coût énergétique de la course et de la marche en fonction de la déclivité de la pente sur laquelle on évolue.

Figure 2 : Cout énergétique de la course selon le gradient de pente (Minetti, 2002) :



J = Joules
 m = Mètres
 i = Inclinaison de la pente

Figure 3 : Coût énergétique de la marche selon le gradient de pente (Minetti, 2002) :



J = Joules
 m = Mètres
 i = Inclinaison de la pente

Cette modélisation laisse apparaître une courbe en J avec une déclivité optimale renvoyant au coût énergétique le plus faible entre -20 et -10% de pente que ce soit pour la marche ou la course. Pour un même gradient nous observons que le coût énergétique de la marche est toujours inférieur à celui de la course. L'augmentation du coût énergétique lorsque que la pente augmente positivement et s'explique par l'augmentation de la part du travail concentrique dans le pattern de course qui est plus coûteux que le travail excentrique. Selon Praz et al (2011) lors de la course à plat la quantité de travail excentrique et concentrique serait la même et la proportion de travail concentrique viendrait à diminuer jusqu'à des pentes à -15% expliquant la baisse du coût énergétique. Au-delà de cette pente le travail de freinage lors de la course deviendrait trop important expliquant l'augmentation du coût énergétique.

1.2.1) Coût énergétique selon la déclivité :

Minetti et al (1993) mettent en avant le fait que les forces de freinage dans le pattern de la marche serait négligeable à partir d'une pente de 20% pour laisser place uniquement à un travail concentrique de propulsion. Dans le cas de la course le travail négatif deviendrait négligeable autour d'un gradient de +30% Minetti et al (1994) cela étant déterminé grâce à une

variation linéaire par les auteurs mais dépassant les capacités aérobies des sujets étudiés pour être vérifié expérimentalement. L'augmentation de la pente expliquerait alors l'augmentation du coût énergétique du déplacement car l'efficacité musculaire (travail réalisé/énergie dépensée) serait 3 à 5 fois plus faible sur un travail positif (concentrique) de propulsion que sur un travail négatif (excentrique) de freinage (Abbot et al 1952).

Dans une étude de Minetti et al (1994) visant à étudier l'évolution du coût énergétique de la course selon la vitesse et la déclivité de la pente ces derniers ont montré que le coût métabolique par unité de distance parcourue était dépendant du gradient de pente mais pas de la vitesse. Excepté pour des inclinaisons très raides (+10, +15%) où le coût métabolique par unité de distance parcourue est plus faible à plus haute vitesse, ces probablement lié au fait que ces conditions excèdent les capacités aérobies des sujets.

1.2.2) L'économie de course :

Barnes & Kilding (2015) définissent l'économie de course comme étant un concept multifactoriel complexe qui représente la somme des caractéristiques métaboliques, cardiorespiratoires, biomécaniques et neuromusculaires durant la course à intensité sous maximale. Plus concrètement l'économie de course correspond à la quantité d'oxygène consommée pour une certaine vitesse de course.

L'économie de course est un facteur de performance primordiale en course à pied et en trail car un coureur économe consommera moins d'énergie qu'un coureur moins économe pour une vitesse donnée. Ehrström et al ont montré dans une étude menée en 2018 que l'économie de course sur une côte à 10% de déclivité était un bon indicateur, au côté de la VO₂ max et de l'endurance musculaire, pour prédire la performance sur un trail XS de 27 km.

L'économie de course découle des efficacités métaboliques, cardio respiratoires, biomécaniques et neuromusculaire de l'athlète, en lien avec sa génétique et son entraînement. Daniels (1985) a montré que l'économie de course pouvait varier de 30% pour des coureurs avec une VO₂max similaire. Une étude de Pate et al (1989) a permis de mettre en avant la corrélation la fréquence cardiaque et la ventilation avec l'évolution de la VO₂. Ainsi il semblerait que les coureurs avec une meilleure économie de course auraient une fréquence cardiaque et une ventilation plus faible pour une vitesse de course équivalente.

Nous allons maintenant voir comment l'économie de course peut être amenée à évoluer dans la course à plat et en côte.

1.2.2.a) Economie de course à plat :

Barnes & Kilding (2015) ont synthétisé au sein d'un tableau les différentes mesures issues de la littérature d'économie de course selon les vitesses et le niveau des athlètes étudiés (Figure 4 : Annexes). Le constat est que plus le niveau de l'athlète est élevé (en lien avec une VO₂ max supérieur) plus il sera économique pour une vitesse de course donnée sur le plat. Ces différences de moyenne s'observent aussi bien chez les hommes que chez les femmes. Nous pouvons illustrer cela avec les données enregistrées à une vitesse de 14 km/h où les coureurs hommes récréatifs (VO₂max 54,1 ml/min/kg) ont une consommation moyenne d'oxygène de 47,4 ml/min/kg alors que les coureurs modérément entraînés (VO₂max 62,2 ml/min/kg) de 46,8 ml/min/kg. Pour cette vitesse les coureurs homme très entraînés (VO₂max 70,8 ml/min/kg) et élite (VO₂max 70,8 ml/min/kg) ont des consommations d'oxygène respectives de 45,0 et 39,9ml/min/kg.

Nous voyons donc ici que les coureurs plus expérimentés, en plus d'avoir des VO₂max supérieures, ont une meilleure économie de course que les autres sur le plat et ce quelle que soit la vitesse de course. Nous pouvons maintenant nous demander si cela se vérifie sur la course en montée

1.2.2.b) Economie de course en montée :

Praz et al (2011) ont cherché à mesurer les différences d'économie de course à la montée chez des coureurs entraînés à la course en montagne versus des coureurs entraîné en course à pied sur le plat. Les résultats de cette étude semblent montrer une meilleure économie de course chez les coureurs de montagne à de faibles vitesses (<9km/h) à plat sans que ces différences soient réellement significatives. En course en déclivité les résultats ne montrent pas de différence de coût énergétique entre les deux groupes pour des pentes comprises entre 4 et 16% à des vitesses de 7,2 et 9km/h. Malgré tout on observe à 7,2 km/h un rendement contre la gravité plus important chez les coureurs de montagnes, cette différence semble s'accroître avec l'augmentation de la pente sans que les résultats soient significatifs.

Ces résultats vont dans le sens des travaux de Balducci et al (2017) qui mettent en avant que l'économie de course à plat n'est pas corrélée à l'économie de course en montée. Selon leur étude les spécialistes de trail auraient des masses musculaires plus élevées au niveau des membres inférieurs induisant une économie de course plus faible sur le plat que les athlètes de haut niveau de course sur route. Par ailleurs les montées ont pour particularité de forcer les

coureurs à marcher en cas de forte déclivité car les demandes énergétiques deviennent trop importantes pour maintenir une vitesse élevée. Le coût énergétique de la marche à différents pourcentages de déclivité serait un des facteurs de performance prépondérant en ultra marathon (Millet & al, 2012) car sur ces épreuves à fort dénivelé les participants effectuent la majorité des ascensions en marchant (Balducci, 2017).

2) La charge additionnelle en trail :

La spécificité de la discipline trail par rapport aux courses sur route est qu'elle nécessite des équipements particuliers pour faire face aux exigences du parcours. S'il peut s'agir simplement de réserve d'eau et de nourriture pour les épreuves de format court à moyen, les formats longs et ultra nécessitent un matériel bien plus spécifique et qui est souvent décrit comme obligatoire au sein du règlement de l'épreuve. Si les athlètes enclins à réaliser de hautes performances essayent d'optimiser au maximum leur bagagerie afin de limiter la charge à transporter, force est de constater que tout traileur vous dira qu'il sent une différence lorsqu'il court avec et sans sac à dos.

2.1) Impact de la charge additionnelle sur les réponses physiologiques lors de la course :

Après avoir détaillé les différents aspects physiologiques de la performance en trail dans la première partie, il ressort que l'amplitude des réponses physiologique est directement liée à l'intensité de l'effort que ce soit en lien avec la vitesse de course et/ou la déclivité de la pente. Ainsi l'ajout de charge sur un coureur, dans la mesure où cela augmente l'intensité de son effort devrait être synonyme d'une augmentation des réponses physiologiques comme pour la vitesse et la déclivité.

Scheer et al (2018) ont cherché à mesurer l'évolution de la consommation d'oxygène et de la fréquence cardiaque chez des coureurs récréatifs évoluant à des vitesses correspondant à 70,80 et 90% de leur vitesse au seuil lactique 2 (sLT) et selon 3 conditions : sans charge, avec sac à dos de 1kg et de 3kg. Les résultats de cette étude ont montré qu'à 80 et 90% de sLT la consommation d'oxygène, la fréquence cardiaque et le coût énergétique de la course augmentaient significativement avec un sac à dos de 3kg en comparaison de la condition sans charge additionnelle (+ 4, 1 et 4,7% de VO₂). La course avec un sac à dos de 1kg a montré une augmentation significative de FC à 80% de sLT et de FC et VO₂ (+ 2,2%) à 90% de sLT en

comparaison à la condition sans charge additionnelle. A vitesse plus faible (70% sLT) aucune différence significative n'a été révélée.

2.2) *Impact de la charge additionnelle sur la marche :*

Looney & al, (2019) ont synthétisé les résultats de 11 études (95 sujets) qui visaient à mesurer les dépenses énergétiques sur différentes déclivités à des vitesses allant jusqu'à 7km/h. Ils ont ressorti une équation qui permet de prédire la dépense énergétique de la marche quelle que soit la pente.

Equation 2 : Equation de la dépense énergétique de la marche (Looney & al, 2019) :

$$EE = 1,44 + 1,94S^{0,43} + 0,24S^4 + 0,34SG(1-1,05^{1-1,1G+32})$$

Où EE représente la dépense énergétique de la marche en $W \cdot kg^{-1}$, S représente la vitesse en $m \cdot s^{-1}$, G représente la pente en %.

Le fait que la quantité d'énergie soit ramené au poids nous permet d'inférer que l'augmentation du poids par l'ajout d'une charge additionnelle fera augmenter de manière significative la dépense énergétique absolue de la locomotion. Cependant il faut prendre du recul par rapport à ces résultats car ces mesures sont réalisées en conditions de laboratoire sur tapis roulant et donc peuvent s'éloigner des conditions que l'on pourrait retrouver sur le terrain.

G.Keren et Al (1981) ont mesuré la consommation d'oxygène à des allures allant de 4 à 11,2 km/h (marche et course) sur tapis de course incliné à 5% avec et sans l'ajout d'un sac de 20kg chez 15 sujets hommes. Les résultats de cette étude montrent que l'ajout du sac augmente la VO2 de manière constante quelle que soit la vitesse. La charge supplémentaire engendrerait une transition de la course vers la marche à une vitesse plus faible que celle en condition normale en particulier chez les sujets plus petits (8,2 km/h). Par ailleurs les auteurs soulignent le fait que pour une même augmentation de vitesse les répercussions physiologiques sont plus importantes lors de la marche (6,4 à 8km/h) que lors de la course (9,6 à 11,2 km/h). Il semblerait que pour augmenter l'intensité de l'effort, augmenter la vitesse de déplacement est plus efficace qu'augmenter la charge portée.

2.3) Impact de l'augmentation de la masse sans modification du poids :

Teunissen & al (2007) ont cherché à mesurer l'impact de l'addition de charge au niveau métabolique sur 10 coureurs amateur sur tapis à 3m/s. les chercheurs ont étudié la variation du coût énergétique de la course par la consommation d'O₂ et la production de Co₂ ainsi que la force de réaction au sol et la cinématique de course en venant manipuler le poids et la masse du corps. Afin de manipuler le poids ils simulaient une variation de gravité grâce à un système de harnais. Pour la variation de masse ils venaient ajouter des lestes autour de la taille. Ils ont mesuré selon 4 conditions : course normale, course avec réduction de poids (25,50,75% poids), course avec augmentation masse et poids (+ 10,20,30%) et course avec augmentation de la masse sans augmentation du poids (+ 10,20,30%).

Figure 5 : Protocole expérimental de Teunissen (2007)

Table 1. *Summary of experimental trials*

Trial	Day 1	Day 2
1	Unloaded standing	Unloaded standing
2	100% BM and 100% BW	100% BM and 100% BW
3	100% BM and 75% BW fixed	110% BM and 110% BW
4	100% BM and 50% BW fixed	120% BM and 120% BW
5	100% BM and 25% BW fixed	130% BM and 130% BW
6	100% BM and 25% BW trolley	130% BM and 100% BW
7	100% BM and 50% BW trolley	120% BM and 100% BW
8	100% BM and 75% BW trolley	110% BM and 100% BW

BM, body mass; BW, body weight; fixed, fixed pulley method; trolley, rolling trolley method.

BM : Masse corporelle

BW : Poids corporel

Fixed : Système de tractation par poulie

Trolley : Système de délestage par chariot

Les résultats de cette étude montrent que le coût métabolique net de la course réduit significativement mais en proportion plus faible que la perte de poids dans la condition de réduction du poids. (Baisse de 19% du coût métabolique pour 75% du poids et de 38 et 55% pour 50 et 25% du poids). A l'inverse le coût métabolique net de la course augmente proportionnellement plus que la charge ajoutée lorsque cette dernière conduit à une augmentation du poids. (Augmentation de 14% du coût métabolique pour 110% poids et de 24 et 38% pour 120 et 130%). Dans la condition d'augmentation de la charge sans augmentation du poids il n'y a pas de différence du coût métabolique net de la course vis-à-vis de la course

en condition normale. Les résultats sont similaires pour les mesures de forces de réaction au sol.

2.4) Impact de la charge additionnelle sur les variables physiologiques en montée :

Beaucoup d'études se sont penchées sur le transport de charge en montée afin d'optimiser les performances des militaires qui font faces à ces conditions au quotidien. Tirthankar et al (2015) ont fait réaliser une tâche de portage en continue sur tapis roulant à 12 soldats indiens. Ces derniers devaient marcher à 3km/h en continue et la déclivité variait toute les 6 minutes de 0, 5, 10, 15 et 20% et inversement vers des pentes négatives. Les auteurs ont mis en place 3 conditions : normale, avec sac de 10,7 et de 21,4 kg pour lesquelles ils mesuraient la VO₂, la FC et la dépense énergétique.

Les résultats de cette étude montrent que la VO₂ augmente linéairement avec l'augmentation de la déclivité et de la charge passant de 12,7 ml/min/kg sans charge à 0% à 38,5 ml/min/kg avec charge de 21,4 kg à 20% de déclivité pour la même vitesse. Les résultats sont similaires pour la fréquence cardiaque, le cout énergétique ainsi que le débit ventilatoire.

2.5) Impact de la localisation de la charge additionnelle :

Martin (1985) a mesuré l'évolution des réponses physiologiques à l'ajout de charge additionnelle sur les jambes lors de la course sur le plat. Pour cela il a mesuré chez 15 coureurs très entraînés la consommation d'oxygène et la fréquence cardiaque lors d'une course à plat sur tapis à 12 km/h selon 5 conditions (sans charge, avec charge de 0,5 et 1kg ajoutées soient à la cuisse soit aux pieds. Les résultats cette étude montrent une augmentation de VO₂ max et de FC significative avec l'ajout de charge quel que soit l'emplacement (excepté pour la FC sur l'ajout de charge aux cuisses). L'étude a montré que l'augmentation de la VO₂ avec l'ajout de leste aux pieds correspondait à environ 7,2%/kg et que cette valeur est deux fois supérieure à l'ajout de leste au niveau des cuisses. L'augmentation des réponses physiologiques dans ces conditions serait liée à l'augmentation du travail mécanique nécessaire pour mobiliser les segments en réponse à une inertie plus grande. Cela se traduisant par une augmentation de la taille de la foulée, du temps de contact au sol et du temps d'envol.

Beaucoup d'études qui se sont intéressées à l'impact de l'ajout de charge sur les pieds sur les réponses physiologiques confirment ces résultats (Jones et al : 4,5%/kg à 12,1 km/h ; Frederick

et al : 6%/kg à 13,8 km/h ; Catlin et Dressendorfer : 8,6, 7,7, 9,4%/kg). Si l'on compare ces chiffres à ceux de l'étude de Scheer et al (2018) nous voyons que l'ajout de charge sur les pieds est bien plus impactant que sur le tronc (+ 2,2% de VO₂ pour 1 kg à 90% sLT) et que cela s'explique par une augmentation plus faible du travail mécanique due à la proximité de la charge vers le centre de gravité dans la deuxième condition.

3) Problématique :

L'analyse de la littérature fait ressortir plusieurs points essentiels sur lesquels nous devons nous appuyer afin de mener à bien notre réflexion. Premièrement toutes les études s'accordent à dire que l'augmentation de l'intensité de l'effort en course lorsque que ce dernier est réalisé en dessous de VMA entraîne une réponse d'augmentation des paramètres physiologiques de manière proportionnelle à cette intensité. La réponse physiologique principalement étudiée est la consommation d'oxygène (VO₂) qui évolue de manière linéaire et proportionnelle à la fréquence cardiaque (FC). L'augmentation de l'intensité de l'effort se traduit par une augmentation du coup énergétique de la course et de la marche. Elle peut relever d'une augmentation de la vitesse de déplacement mais aussi d'une augmentation de la déclivité de la surface de course. Certaines études ont montré que les coureurs experts ont une économie de course supérieur sur le plat, néanmoins elles mettent en avant le fait qu'il n'y ait pas de corrélation entre l'économie de course à plat et en montée.

Par ailleurs notre analyse de la littérature nous a permis de mettre en avant le fait que l'ajout d'une charge lors de la course entraîne une baisse de l'économie de déplacement se traduisant par une augmentation des réponses physiologiques pour une vitesse donnée. L'étude que nous avons ciblée fait ressortir que la masse ajoutée doit être suffisamment élevée afin d'obtenir des différences significatives sur des efforts à intensité proches du seuil lactique (SL). D'autres études ont confirmé des réponses similaires en marche et en course avec déclivité. Enfin les recherches mettent en avant que la disposition de la charge joue aussi un rôle sur le niveau d'impact sur l'économie de course. Nous pouvons mettre en avant le fait que les charges ajoutées sur le dos et le buste auront un impact moindre en comparaison aux charges plus distales (membres inférieurs) se traduisant par une augmentation du travail mécanique et d'une baisse de l'économie de course.

Si la littérature est plutôt riche en ce qui concerne l'étude de l'économie de course selon la déclivité ainsi que l'impact de la charge additionnelle sur cette dernière, aucune étude n'a concilié ces deux aspects en vue de comparer l'impact d'une même charge sur la course à plat et en montée. Nous sommes donc en mesure de nous demander :

L'ajout d'une charge additionnelle lors de la course est-elle plus impactante sur le plat ou en montée ?

En nous inspirant des travaux menés indépendamment sur l'étude de l'évolution de l'économie de course selon la déclivité nous essayerons de confirmer le fait qu'il n'y ait pas de lien entre économie de course à plat et en montée.

De plus nous chercherons à vérifier le fait qu'une charge suffisamment conséquente augmente le coût énergétique du déplacement quelle que soit la vitesse et la déclivité dans la mesure où l'intensité de l'effort est suffisamment proche du seuil lactique.

Notre hypothèse est que la charge additionnelle sera plus impactante en montée car le corps est déjà amené à lutter contre la gravité, se traduisant par une augmentation des réponses physiologiques plus grande en côte ainsi qu'une perception de l'effort plus élevée.

II) Méthodologie :

1) Participants :

Les participants de cette étude sont des enseignants d'EPS volontaires de 23,5 ($\pm 1,5$) ans (2 filles). Ils pratiquent tous la course à pied de manière récréative avec une fréquence de 2 à 4 entraînements par semaine. Les profils sont très différents avec des masses corporelles qui vont de 47 à 77 kg. 3 participants n'avaient jamais couru sur tapis de course mais aucun n'a exprimé de difficulté particulière. Il se sont portés volontaires pour effectuer le protocole après leur journée de travail et les tests ont été réalisés sur 3 sessions différentes avec à chaque fois 2 cobayes.

2) Protocole :

Chaque session de test consistait en la réalisation d'efforts sur tapis de course avec mesure de la réponse physiologique et de perception de l'intensité de l'effort. Les efforts étaient sous la forme de paliers de 3 minutes à intensité constante alternés avec des périodes de récupération de 1 minute. Le choix du palier de 3 minutes s'est fait en se basant sur des travaux similaires et qui mettaient en avant que c'est la durée correspondant à la phase rapide de la cinétique de la VO₂ et permettant donc l'augmentation et la stabilisation de cette dernière.

4 conditions ont été mise en place : course à plat sans sac à dos, course à plat avec sac à dos, course en côte sans sac à dos, course en côte avec sac à dos. Chaque condition comportait 3 paliers correspondants à 3 vitesses distinctes effectuées à la suite de manière croissante. Pour les conditions à plat les vitesses choisies étaient 10, 11,5 et 13km/h et 6, 7 et 8km/h en condition de côte pour une pente à 10%.

Le choix des vitesses à plat s'est fait en s'inspirant des études menées sur l'évolution du cout énergétique de la course, l'objectif étant de proposer pour le public ciblé des vitesses suffisamment proches de leur seuil lactique sans avoir la possibilité de le déterminer en laboratoire. Le choix des vitesses dans la condition de course en côte s'est opéré en s'inspirant des travaux menés sur les mesures du coût énergétique du déplacement en montée. Avec la volonté d'imposer un déplacement en marchant (6 km/h), un déplacement en courant (8 km/h) et un déplacement libre (7km/h). Afin de déterminer l'inclinaison de la pente nous avons fait des tests afin de proposer des paliers d'une intensité relativement similaire à celles proposées

dans les conditions de course à plat. Ainsi par démarche d'essai-erreur nous avons trouvé qu'à 6 km/h dans une côte à 10% la fréquence cardiaque était relativement similaire à celle à 10km/h sur le plat. Cela n'ayant pas une importance fondamentale dans nos tests nous en sommes restés à une analyse individuelle plutôt qu'à un réel raisonnement scientifique.

Au niveau de la charge additionnelle nous avons opté pour un sac de trail lesté de 3 kg. Cette charge correspond à celle qui a montré les résultats les plus significatifs dans l'étude de Scheer et al (2018). De plus elle correspond aux charges que peuvent être amené à porter les traileurs sur des épreuves de longues durées nécessitant du matériel obligatoire et une autonomie suffisante en eau et nourriture.

Enfin afin de limiter l'impact de la dérive cardiaque due à l'accumulation de la fatigue dans la réalisation successive de chaque palier avec des temps de récupération faibles (36 minutes de course au total), nous avons fait le choix de proposer un ordre différent de réalisation des conditions pour chaque sujet. Aucun sujet n'ayant réalisé les conditions dans le même ordre. Si individuellement nous pouvons observer des dégradations liées à la fatigue dans les paliers de la dernière condition, nous espérons limiter l'impact de cette dégradation sur l'ensemble de l'étude grâce à la rotation dans l'ordre de chaque condition entre les tests.

3) Mesures :

Les mesures qui nous ont intéressé sont les réponses physiologiques ainsi que la perception de l'effort (RPE). Pour les réponses physiologiques, ne disposant pas de mesureur d'échange gazeux, nous nous sommes focalisés sur la fréquence cardiaque. Pour cela les sujets disposaient de leur propre montre connectée avec capteur intégré ou bien d'une montre Garmin liée à un cardio fréquencemètre. Ne disposant pas du matériel en double, seule la moitié de l'échantillon a disposé du cardio fréquencemètre. Pour le prélèvement des données nous avons fait la moyenne de la fréquence cardiaque instantanée des 30 dernières secondes de chaque palier considérant que cette dernière se serait stabilisée chez tous les sujets.

Afin d'étudier la perception de l'effort des sujets nous leur avons demandé à la fin de chaque palier d'évaluer leur niveau d'effort (RPE) sur 10 en nous basant sur l'échelle de Borg modifiée (1982) (Figure 6 : Annexes) qui était disposée en permanence sous leurs yeux durant le protocole.

L'intégralité des tests ont été réalisés sur tapis de course inclinables, le prélèvement de la RPE se faisait immédiatement à la fin de chaque palier. Un seul modèle de sac a été utilisé, le lesté consistait en une poche d'eau d'un litre remplie au maximum ainsi qu'un disque d'haltère de

2kg calé de sorte qu'il ne bouge pas. Des pauses de 2 minutes ont été effectuée entre chaque conditions pour permettre aux sujets de se reposer et de préparer les tapis pour la condition suivante. Les sujets avaient à leur disposition de l'eau pour s'hydrater durant les pauses entre les paliers.

4) Analyse :

Afin de confirmer la justesse de notre protocole expérimental dans le choix de nos vitesses nous analyserons l'évolution de la fréquence cardiaque et de la perception de l'effort sur nos différents paliers. Pour déterminer si les différences de FC et de RPE sont significatives entre chaque palier nous utiliserons un test T de student pour échantillons appariés.

Nous effectuerons la même analyse statistique afin de déterminer sur chaque palier si la charge ajoutée a impacté significativement la FC et la RPE.

Avec pour objectif de confirmer qu'il n'y a pas de lien entre économie de course à plat et en montée nous utiliserons une matrice de corrélation sur les données de fréquences cardiaques prélevées dans les deux conditions en utilisant le coefficient r de Pearson.

Enfin nous analyserons l'impact de la charge additionnelle par l'augmentation en pourcentage de la fréquence cardiaque et la variation de la perception de l'effort dans les conditions à plat en comparaison à celles en montée. Nous déterminerons si ces différences sont significatives à l'aide d'un T de student pour échantillons appariés.

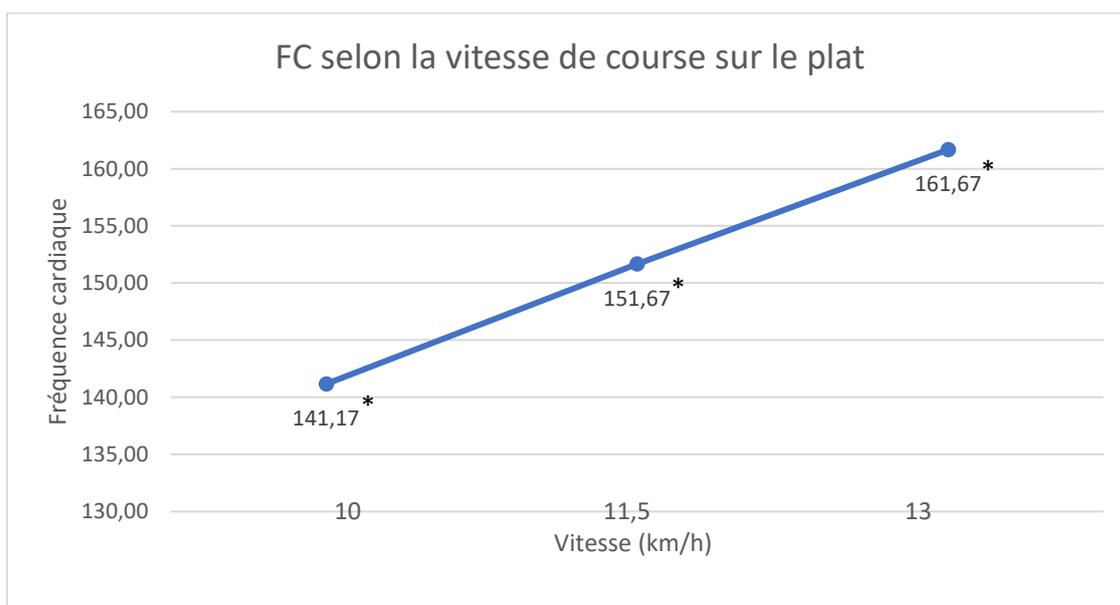
III) Résultats :

1) Influence de la variation de la vitesse de course :

1.1) Variation de la vitesse de course à plat :

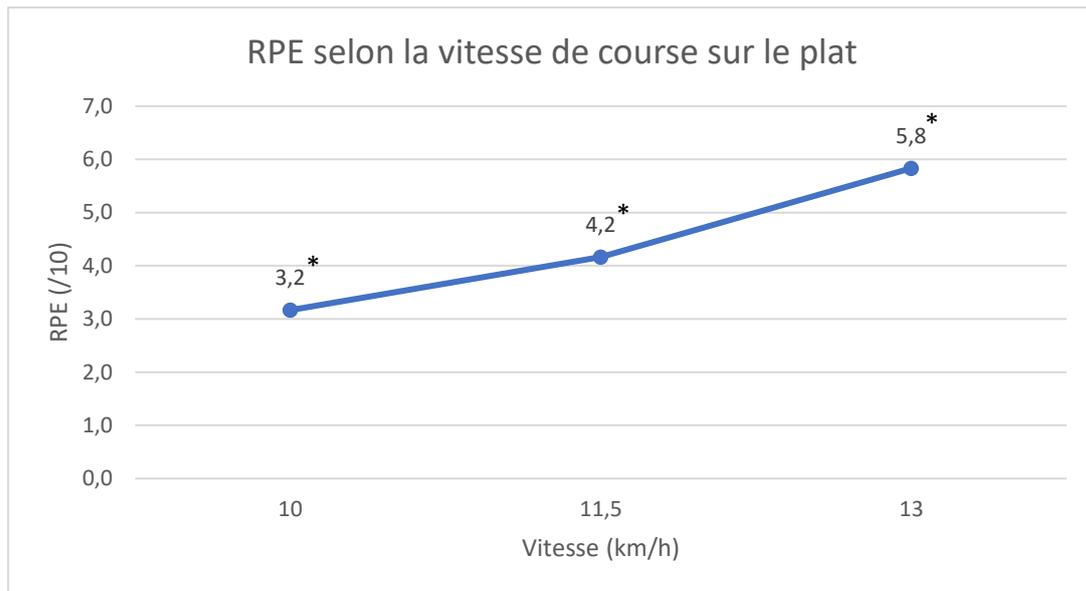
1.1.1) Influence sur la fréquence cardiaque :

La fréquence cardiaque moyenne dans la condition à plat à 10km/h est de 142 ($\pm 13,3$) battements par minutes (bpm). Elle est significativement inférieure ($p < 0,001$) à la fréquence cardiaque moyenne des sujets à 11,5 km/h qui est de 152 ($\pm 12,7$) bpm. La fréquence cardiaque moyenne à 13 km/h est de 162 ($\pm 11,4$) bpm et est significativement supérieure ($p < 0,001$) aux FC à 10 et 11,5 km/h.



1.1.2) Influence sur la perception de l'effort :

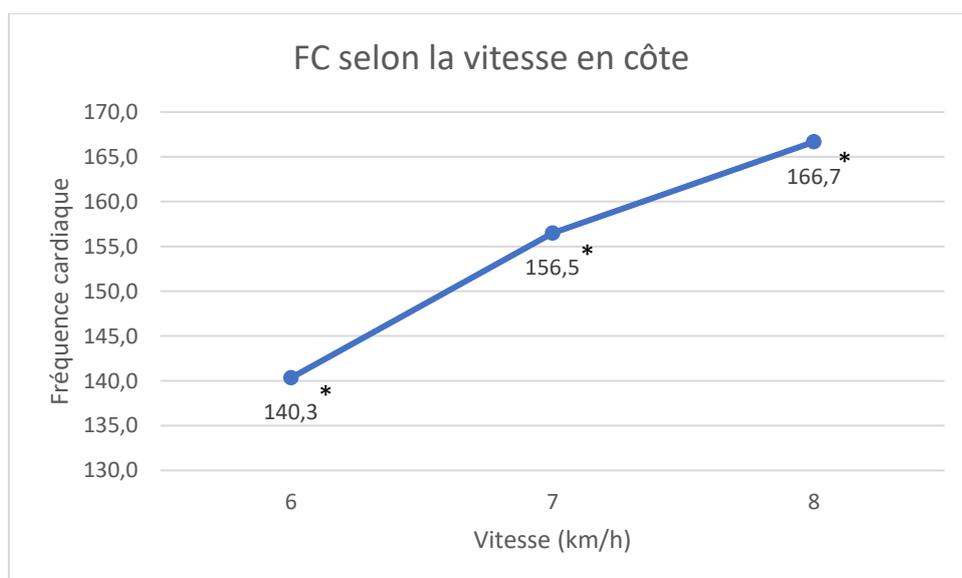
La perception de l'effort moyenne dans la condition à plat à 10 km/h est de 3,17 ($\pm 0,68$), elle est significativement inférieure ($p = 0,009$) à celle en condition 11,5 km/h qui est de 4,17 ($\pm 1,2$). La valeur de RPE moyenne des sujets à 13 km/h est de 5,83 ($\pm 1,5$) et est significativement supérieure ($p = 0,004$) à celles à 10 et 11,5 km/h.



1.2) Variation de la vitesse de course en côte :

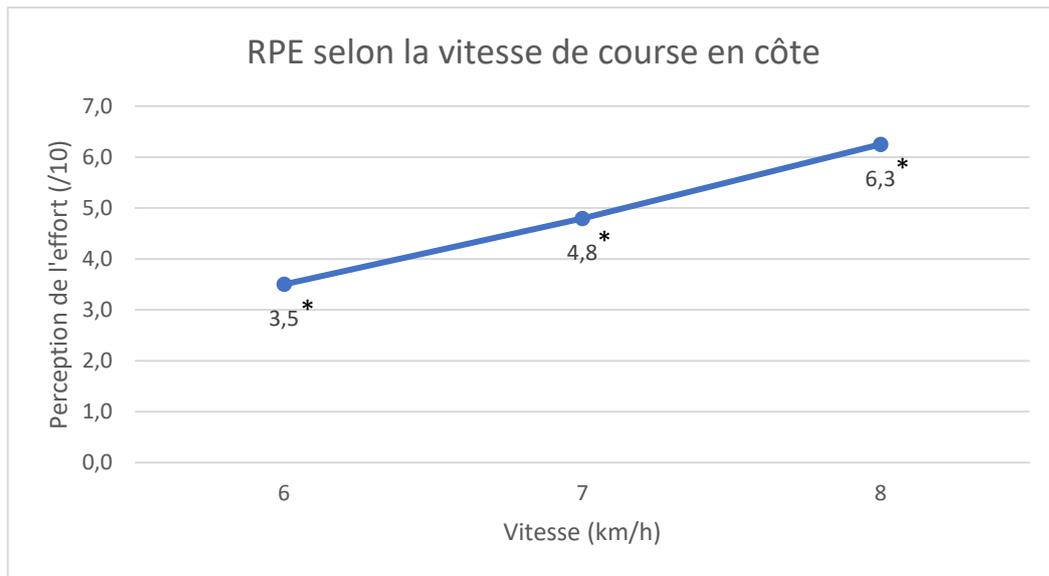
1.2.1) Influence sur la fréquence cardiaque :

La fréquence cardiaque moyenne dans la condition en côte à 6 km/h est de 140 ($\pm 7,3$) battements par minutes (bpm). Elle est significativement inférieure ($p < 0,001$) à la fréquence cardiaque moyenne des sujets à 7 km/h qui est de 157 ($\pm 6,2$) bpm. La fréquence cardiaque moyenne à 8 km/h est de 167 ($\pm 5,9$) bpm et est significativement supérieure ($p < 0,001$) aux FC à 6 et 7 km/h.



1.2.2) Influence sur la perception de l'effort :

La perception de l'effort moyenne dans la condition en côte à 6 km/h est de 3,50 ($\pm 1,2$), elle est significativement inférieure ($p < 0,001$) à celle en condition 7 km/h qui est de 4,79 ($\pm 1,3$). La valeur de RPE moyenne des sujets à 8 km/h est de 6,25 ($\pm 1,5$) et est significativement supérieure ($p < 0,001$) à celles à 6 et 7 km/h



2) Lien entre économie de course à plat et en montée :

L'analyse des différentes données de fréquences cardiaques sur le plat et en côte par le biais d'une matrice de corrélation et de l'indice r de Pearson permet de faire ressortir le lien entre les différentes conditions. Les valeurs de fréquences cardiaques moyennes sur chaque palier à plat sont corrélées positivement entre elles ($p < 0,05$ et $p < 0,01$). Les valeurs de fréquence cardiaques moyennes sur chaque palier en côte sont corrélées positivement entre elles ($p < 0,05$). Il n'y a aucune corrélation entre les valeurs de fréquence cardiaque sur les paliers à plat et en côte.

Matrice de corrélation

		Plat 10	Plat 11,5	Plat 13	Côte 6	Côte 7	Côte 8	Moy FC plat	Moy FC côte
Plat 10	r de Pearson	—							
	valeur p	—							
Plat 11,5	r de Pearson	0.953**	—						
	valeur p	0.003	—						
Plat 13	r de Pearson	0.899*	0.974**	—					
	valeur p	0.015	0.001	—					
Côte 6	r de Pearson	0.575	0.467	0.386	—				
	valeur p	0.233	0.350	0.450	—				
Côte 7	r de Pearson	0.685	0.514	0.479	0.871*	—			
	valeur p	0.133	0.296	0.336	0.024	—			
Côte 8	r de Pearson	0.682	0.525	0.570	0.465	0.830*	—		
	valeur p	0.136	0.285	0.238	0.353	0.041	—		
Moy FC plat	r de Pearson	0.969**	0.996***	0.976***	0.481	0.565	0.599	—	
	valeur p	0.001	< .001	< .001	0.334	0.242	0.209	—	
Moy FC côte	r de Pearson	0.712	0.554	0.523	0.883*	0.997***	0.825*	0.603	—
	valeur p	0.112	0.254	0.287	0.020	< .001	0.043	0.205	—

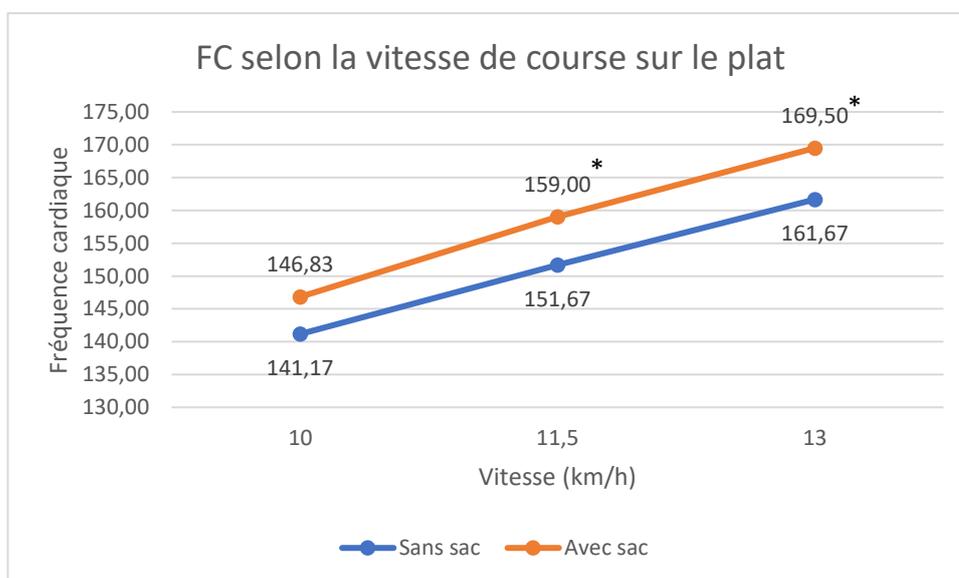
Note. * p < .05, ** p < .01, *** p < .001

3) Impact de la charge additionnelle sur le plat et en côte :

3.1) Impact de la charge additionnelle sur la course à plat :

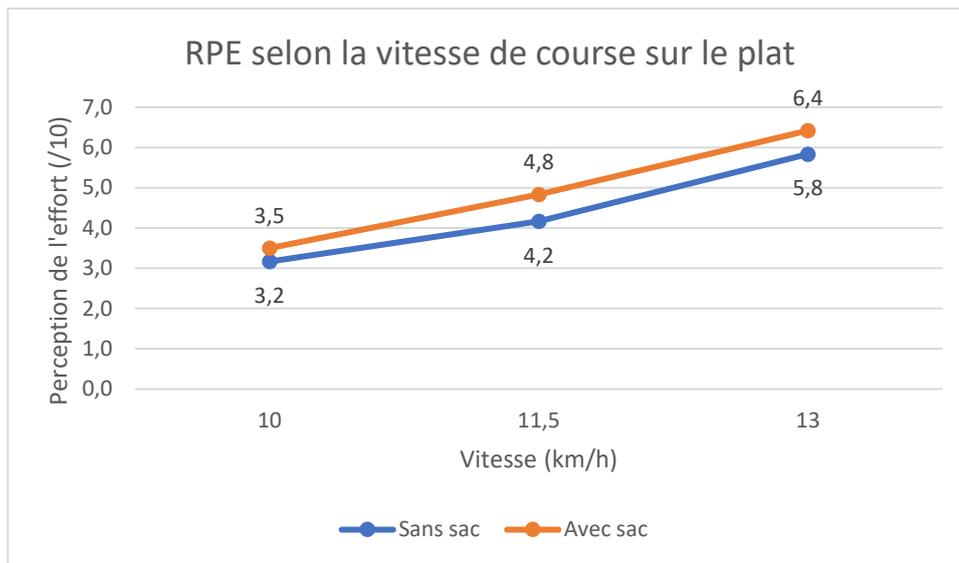
3.1.1) Impact sur la fréquence cardiaque :

La fréquence cardiaque moyenne dans la condition à plat avec sac à 10km/h est de 146,8 ($\pm 12,53$) bpm, cette dernière n'est pas significativement supérieure à la condition sans sac sur le même palier ($p=0,057$). Les fréquences cardiaques moyennes dans les conditions à plat avec sac à 11,5 et 13 km/h sont de 159 ($\pm 9,96$) et 169,5 ($\pm 8,94$) bpm, elles sont significativement supérieures aux mêmes paliers de la condition sans sac ($p<0,05$).



3.1.2) Impact sur la perception de l'effort :

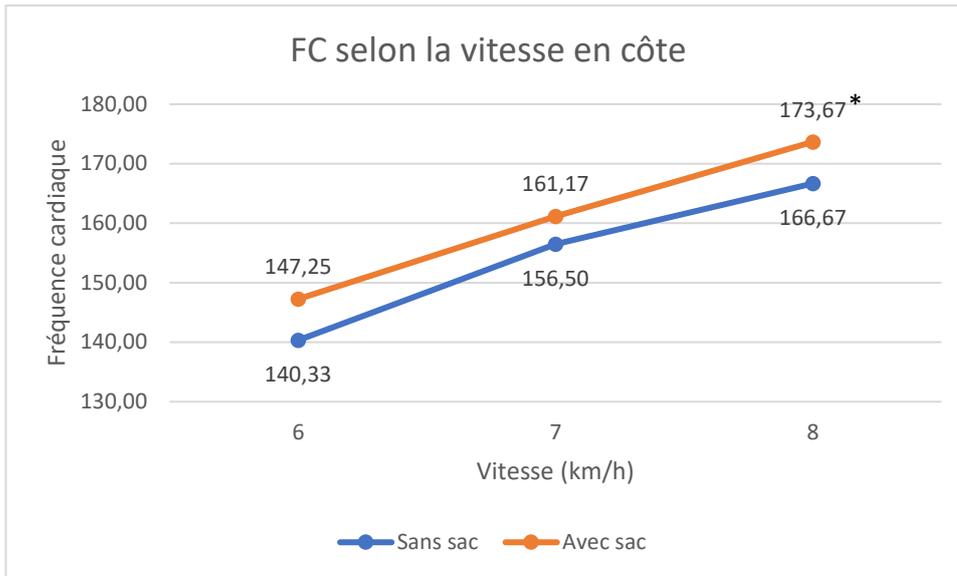
La perception de l'effort moyenne dans la condition à plat avec sac sur les paliers 10, 11,5 et 13 km/h sont de 3,5 ($\pm 1,27$), 4,83 ($\pm 1,291$) et 6,42 ($\pm 1,594$). Aucune d'entre elles n'est significativement supérieure à son palier équivalent dans la condition sans sac ($p=0,316$, $p=0,137$ et $p=0,079$).



3.2) Impact de la charge additionnelle sur la course en côte :

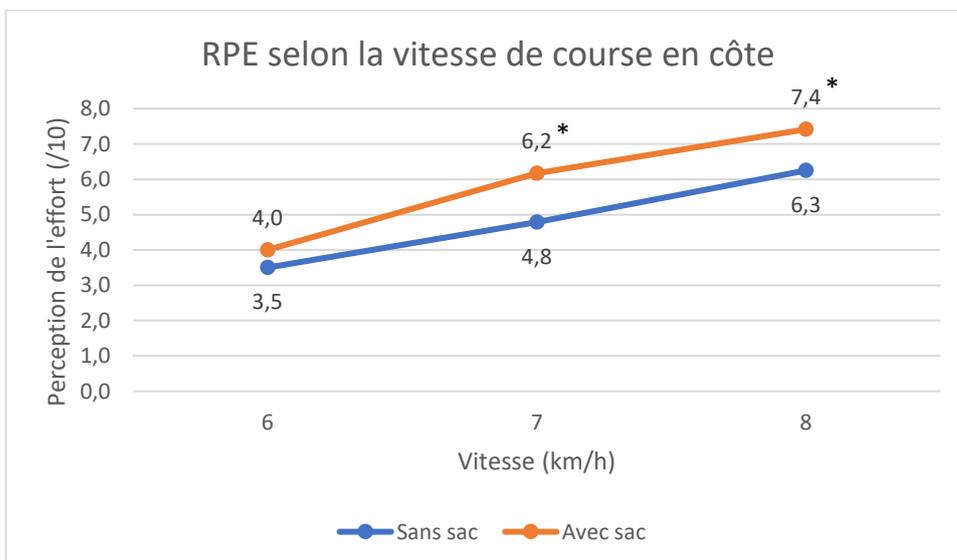
3.2.1) Impact sur la fréquence cardiaque :

La fréquence cardiaque moyenne dans les conditions en côte avec sac à 6 et 7 km/h sont de 147,3 ($\pm 3,86$) et 161,2 ($\pm 9,26$) bpm, ces dernières ne sont pas significativement supérieures à condition sans sac sur les mêmes paliers ($p= 0,112$ et $p= 0,100$). La fréquence cardiaque moyenne dans la condition en côte avec sac à 8km/h est de 173,7 ($\pm 8,02$) bpm, elle est significativement supérieure au même palier de la condition sans sac ($p<0,05$).



3.2.2) Impact sur la perception de l'effort :

La perception de l'effort moyenne dans la condition en côte avec sac à 6 km/h est de 4,0 ($\pm 0,447$), elle n'est pas significativement supérieure à la condition en côte sans sac à 6 km/h ($p=0,115$). Les perceptions de l'effort moyennes dans la condition en côte avec sac à 7 et 8 km/h sont de 6,17 ($\pm 0,753$) et 7,42 ($\pm 0,736$), elles sont significativement supérieures aux mêmes paliers dans la condition en côte sans sac ($p<0,01$).

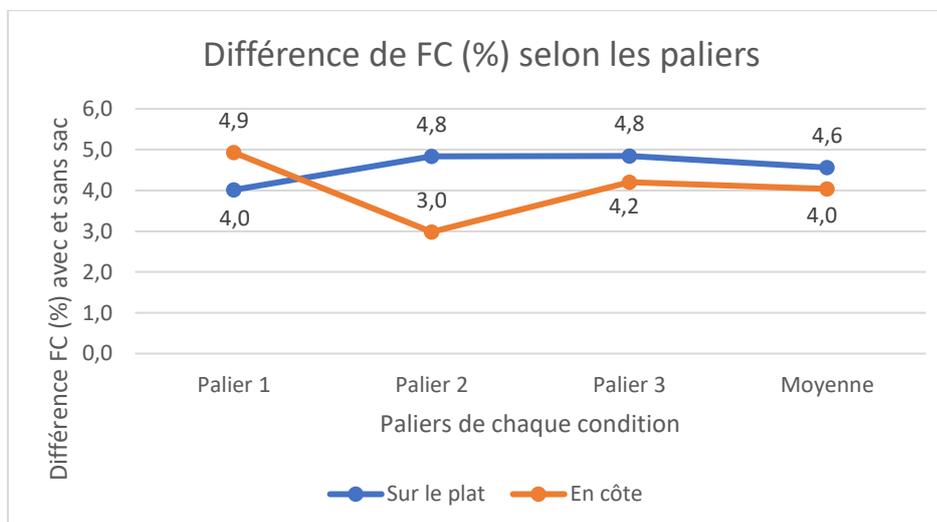
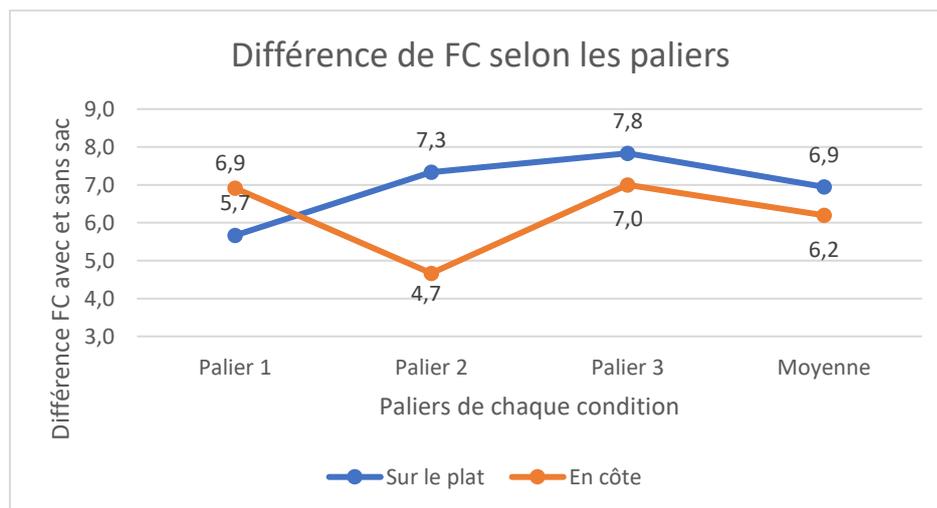


3.3) Comparaison de l'impact de la charge sur la course à plat et en côte :

3.3.1) Comparaison de la fréquence cardiaque :

L'ajout de la charge additionnelle lors de la course augmente en moyenne la fréquence cardiaque de 4,75 ($\pm 4,48$) % dans la condition de course à plat. Cette augmentation n'est pas significativement différente de celle en condition de course en côte qui est de 3,72 ($\pm 3,99$) % ($p > 0,05$).

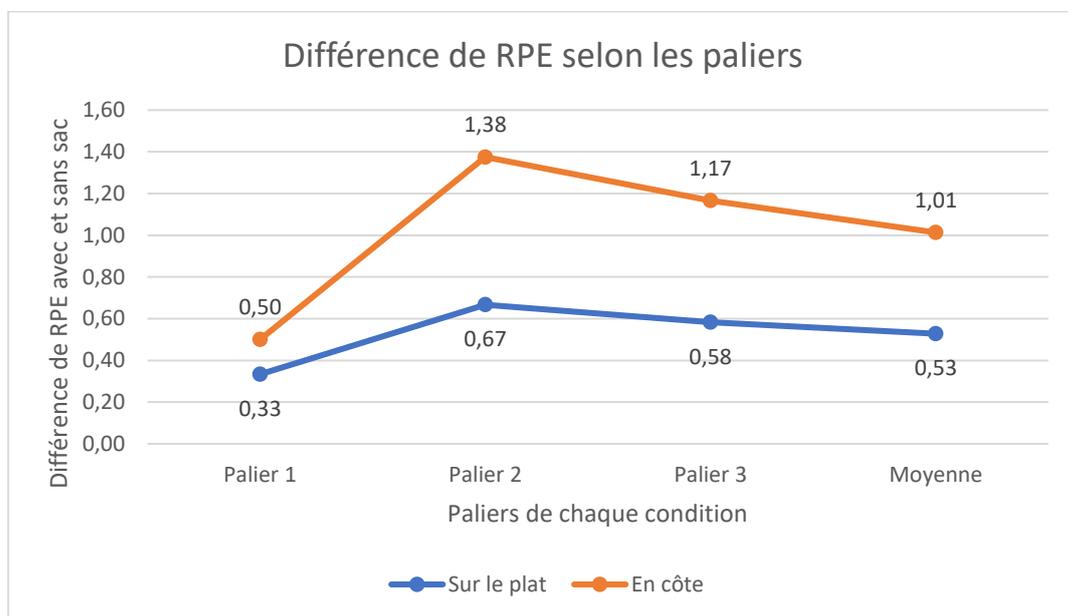
L'ajout de la charge additionnelle augmente la fréquence cardiaque des paliers 10, 11,5 et 13 km/h respectivement de 3,10 ($\pm 4,82$) %, 5,08 ($\pm 5,56$) % et 5,04 ($\pm 5,13$) %. Aucune différence significative n'a été trouvée par des comparaisons individuelles avec les paliers en côte à 6, 7 et 8 km/h dont les augmentations respectives sont de 5,49 ($\pm 6,84$) %, 3,00 ($\pm 5,01$) % et 4,20 ($\pm 3,25$) %.



3.3.2) Comparaison de la perception de l'effort :

L'ajout de la charge additionnelle lors de la course augmente en moyenne la perception de l'effort de $0,53(\pm 1,19)$ dans la condition de course à plat. Cette augmentation n'est pas significativement différente de celle en condition de course en côte qui est de $1,14 (\pm 0,82)$ ($p=0,17$).

L'ajout de la charge additionnelle augmente la perception de l'effort des paliers 10, 11,5 et 13 km/h respectivement de $0,33 (\pm 1,60)$, $0,67 (\pm 1,33)$ et $0,58 (\pm 0,86)$. Aucune différence significative n'a été trouvée par des comparaisons individuelles avec les paliers en côte à 6, 7 et 8 km/h dont les augmentations respectives sont de $0,50 (\pm 0,89)$, $1,38 (\pm 0,80)$ et $1,17 (\pm 0,75)$.



IV) Discussion :

1) Analyse des résultats :

Dans cette partie nous allons développer nos résultats de sorte à les mettre en lien avec ceux des études référencées dans notre état de l'art et afin de répondre à notre problématique en validant ou non notre hypothèse initiale.

Premièrement nous pouvons valider nos choix en termes d'intensités définies, en effet les fréquences cardiaques relevées dans la condition à plat sans sac évoluent linéairement avec l'augmentation de l'effort. Dans la condition en côte sans sac nous observons un léger décrochage pour le palier à 7km/h qui peut être expliqué par le fait que tous les sujets ont préféré réaliser ce palier en courant venant majorer la dépense énergétique vis-à-vis du palier 6km/h qui se faisait en marchant. Au niveau de la perception de l'effort dans les deux conditions nous observons une quasi-linéarité de l'augmentation de la RPE avec l'augmentation de la vitesse de déplacement.

Au niveau de l'équivalence d'intensité entre les conditions à plat et en côte nous pouvons mettre en avant que les fréquences cardiaques atteintes à 10 km/h à plat sont très similaires à celles atteintes à 6 km/h en côte à 10% de déclivité. Néanmoins nous observons une augmentation plus importante de la fréquence cardiaque sur les paliers dans la condition en côte. Dans une perspective où nous chercherions à reproduire des intensités strictement identiques entre les paliers nous pourrions utiliser la formule de Minetti (2002) permettant de déterminer le coût énergétique du déplacement selon la déclivité de la pente :

Equation 3 : Coûts énergétiques de la course et de la marche selon le gradient de pente

(Minetti 2002) :

$$\text{Pour la marche : } Cw_i = 280.5i^5 - 58.7i^4 - 76.8i^3 + 51.9i^2 + 19.6i + 2.5 \text{ en J.kg}^{-1}.\text{m}^{-1}$$

$$\text{Pour la course : } Cr_i = 155.4i^5 - 30.4i^4 - 43.3i^3 + 46.3i^2 + 19.5i + 3.6 \text{ en J.kg}^{-1}.\text{m}^{-1}$$

Où i correspond au gradient de la pente.

La matrice de corrélation sur les conditions sans sac à plat et en côte ne révèle pas de corrélation sur les fréquences cardiaques atteintes entre chaque palier dans chacune des conditions. Nous pouvons interpréter cela de manière à confirmer le fait qu'il n'y ait pas de liens entre l'économie de course à plat et celle en côte chez un même coureur. Dans notre cas cela se traduit par le fait qu'une augmentation linéaire de la vitesse dans chacune des conditions entraîne une

augmentation proportionnelle de la fréquence cardiaque mais dans des proportions différentes chez chaque sujet. Par ailleurs si on observe au niveau individuel les fréquences cardiaques des sujets sur chaque palier nous pouvons voir que certains ont des valeurs fréquences cardiaques très proches sur les paliers d'une même condition mais très éloignées sur les paliers d'une autre condition.

Nos résultats sur l'impact de la charge additionnelle sur le coût énergétique du déplacement tendent à confirmer les conclusions des travaux de Scheer et al (2018). Nous observons comme dans leur étude une augmentation significative de la fréquence cardiaque sur les paliers les plus rapides dans chaque condition. Dans la condition à plat l'impact de la charge additionnelle est majoré sur les paliers 11,5 et 13 km/h et l'écart est significatif par rapport à la condition sans sac. Dans la condition en côte l'écart de fréquence cardiaque est plus faible sur le palier 7 km/h en comparaison aux paliers 6 et 8 km/h. Seul le palier 8 km/h témoigne d'un écart significatif avec la condition sans sac ce qui est en cohérence avec les résultats de Scheer et al (2018) qui avaient trouvé un impact significatif sur la fréquence cardiaque avec charge de 3kg uniquement sur les paliers les plus proches du seuil lactique.

Au niveau de la perception de l'effort, aucune différence significative n'a été trouvée entre les conditions à plat avec et sans sac. N'ayant pas traité de l'aspect psychologique de l'effort dans la partie revue de littérature nous ne sommes pas en mesure de situer ces résultats vis-à-vis d'études similaires. Néanmoins nous pouvons observer une RPE légèrement supérieure en faveur de la condition avec sac sur le palier à 10 km/h et une différence qui augmente sur les paliers 11,5 et 13 km/h en concordance avec ce que nous avons observés pour la fréquence cardiaque. Il est intéressant de noter que dans la condition en côte nous avons trouvé un impact de la charge additionnelle significatif sur les paliers 7 et 8 km/h, cela va dans le sens de notre hypothèse mettant en avant le fait que la charge serait plus impactante en côte que sur le plat.

La comparaison de l'augmentation de la fréquence cardiaque n'a révélé aucune différence significative de l'impact de la charge additionnelle entre la condition à plat et celle en côte. Nous ne pouvons donc pas valider notre hypothèse mettant en avant que la charge additionnelle serait plus impactante en côte du fait que le déplacement est d'avantage soumis à la lutte contre la gravité. Par ailleurs nos résultats tendent à démontrer l'inverse avec un impact légèrement supérieur dans la condition à plat lorsqu'on compare la moyenne des paliers de chaque condition. Il est intéressant de noter que sur le palier 1 cela ne se vérifie pas, peut être en lien avec le fait que c'est un palier réalisé en marchant dans la condition en côte.

Inversement l'analyse comparative des données de perception de l'effort met en avant un impact de la charge additionnelle qui serait plus important dans la condition en côte. Même si ces écarts

ne sont pas significatifs nous observons une augmentation moyenne de la RPE dans la condition en côte deux fois supérieure à celle de la condition à plat. Cela va dans le sens de notre hypothèse et nous amène à réfléchir sur les limites de notre expérience notamment dans la fiabilité de l'utilisation de la fréquence cardiaque.

2) *Limites :*

La principale limite que nous pouvons mettre en avant au sein de nos tests est le faible nombre de sujets étudiés ($n = 6$) qui limite la fiabilité de nos résultats. Corrélé aux différences inter-individuelles en termes de réponses physiologiques sur les différents paliers, nous nous sommes heurté à des écarts types très importants limitant la possible significativité de nos résultats. Par ailleurs le fait de réaliser l'ensemble des conditions sur une même session a induit une fatigue impactant la réalisation des derniers paliers. Nous pouvons par exemple observer chez un des sujets des fréquences cardiaques plus importantes dans les conditions sans sac à dos car il les a réalisés en dernière partie du protocole de test. Encore une fois le faible nombre de sujet n'a permis de limiter que partiellement l'impact de cette fatigue au travers de notre choix d'alterner l'ordre des conditions entre les sujets.

Au niveau du prélèvement des données nous pouvons mettre en avant la faible fiabilité des valeurs de fréquences cardiaques mesurées par l'intermédiaire des montres GPS. Par exemple 2 mesures de fréquences cardiaques sur les paliers 6 km/h en côte sans sac n'ont pas pu être comptabilisées tant elles différaient de la norme. Par ailleurs nous pouvons remettre en question la fiabilité de la mesure de la fréquence cardiaque comme valeur permettant de témoigner du coup coût énergétique de la course. En effet mis à part le fait qu'elle soit facile à mesurer, elle reste trop dépendante des conditions extérieures à l'effort. Par exemple certains sujets ont exprimé que leur fréquence cardiaque était anormalement élevée due à la fatigue de la journée. De plus les conditions de course sur tapis en environnement fermé entraînent une augmentation de la chaleur corporelle très importante et donc un surcoût énergétique alloué à la thermorégulation. En combinaison avec le phénomène de dérive cardiaque, en lien avec la succession des efforts répétés, nous obtenons au niveau individuel des valeurs de fréquences cardiaques erronées, ne traduisant pas du véritable coût énergétique de la course, en particulier sur la réalisation des conditions en dernière partie de test.

La mesure de la perception de l'effort semble représenter plus fidèlement ce que coûte l'effort au sujet. Encore une fois elle relève de différences interindividuelles importantes dues au niveau des sujets et à leur expérience à exprimer leurs ressentis et évaluer leurs sensations. Le fait que

l'augmentation de la RPE avec l'ajout du sac à dos soit plus important en côte inversement à la fréquence cardiaque (outre le fait que ces différences ne soient pas significatives) permet de souligner une autre nuance à l'utilisation de la fréquence cardiaque comme mesure de références. En effet nous sommes en mesure de nous demander si les mesures de fréquences cardiaques dans la condition de côte sont révélatrices de l'effort effectué de manière aérobie, ou si ces conditions entraînent en réalité une forte part d'effort anaérobie, peut être avec des fibres musculaires moins vascularisées dont le travail n'est pas reflété au travers de l'augmentation de la fréquence cardiaque.

3) Perspectives :

Après avoir énoncé nos limites il nous semble important de proposer des alternatives permettant de dépasser les difficultés rencontrées en vue d'améliorer et dépasser notre protocole. Premièrement il nous semble primordial de mettre en avant qu'une étude statistique de nos données nécessite un échantillon plus important afin de permettre l'obtention de résultats significatifs. De plus du matériel plus précis semble de rigueur afin d'obtenir des valeurs de fréquences cardiaques les plus justes possible et éviter les fausses valeurs qui réduisent encore la taille de l'échantillon de données.

Mise à part l'amélioration des conditions matérielles, le protocole pourrait être amélioré en proposant la prise de données sur deux sessions par sujet. Cela permettrait de limiter encore davantage les biais liés à la fatigue en fin de palier mais nécessiterait une rigueur supplémentaire afin de proposer des conditions de test strictement identiques sur chaque session.

La perception de l'effort est une donnée qui nous paraîtrait intéressante de reconduire sur des expériences identiques ultérieurement. Outre la fréquence cardiaque il serait préférable de mesurer la consommation d'oxygène avec des échangeurs gazeux témoignant de manière plus précise du coût réel du déplacement. Nous envisageons que le prélèvement de la lactatémie à chaque palier pourrait être intéressant afin de déterminer la part de la filière anaérobie lactique dans la production d'énergie, en particulier dans les paliers les plus rapides en côte.

Au sein de notre expérience il était difficile de comparer les réponses des sujets plus légers à celles des sujets plus lourds pour une même charge, nous pourrions faire évoluer le dispositif en proposant des charges correspondantes à un pourcentage de la masse de chaque sujet afin de voir si on obtient une harmonisation des réponses ou non.

Enfin pour dépasser notre problématique nous trouverions intéressant d'identifier des profils types de coureurs en fonction de leur économie de course à plat et en côte et de l'impact de la charge additionnelle sur leurs différentes variables physiologiques et leur perception de l'effort. Nous pourrions ensuite aller plus loin en proposant des stratégies de gestion du sac à dos sur des courses alternants des profils avec du dénivelé et des sections plus plates.

V) Conclusion :

Le trail étant une discipline comportant différents profils et distances de course, les coureurs sont souvent amenés à devoir transporter du matériel, de la nourriture et de l'eau au sein de sacs pouvant peser plusieurs kilos. De ce constat notre travail nous a amené à réfléchir sur l'impact de cette charge additionnelle sur le coût énergétique du déplacement en trail. Notre hypothèse était que la charge additionnelle serait plus impactante lors de la course en côte en comparaison à la course à plat. Pour cela nous avons mis un dispositif visant à étudier la variation de la fréquence cardiaque et de la perception de l'effort avec et sans sac à dos sur différentes vitesses à plat et sur une côte de 10% sur tapis de course. Si nos données ont permis de montrer une augmentation significative des valeurs de FC et de RPE sur les paliers les plus intenses dans les deux conditions, nous n'avons pas trouvé de différence significative en faveur d'un impact plus grand dans une des deux conditions. La charge additionnelle semble impacter davantage le coût énergétique dans la condition à plat et davantage la perception de l'effort en côte. Il serait intéressant de reconduire une expérience similaire avec plus de moyens afin de voir si nous obtenons des différences significatives sur nos variables.

Bibliographie :

Abbott, B. C., Bigland, B., & Ritchie, J. M. (1952). The physiological cost of negative work. *The Journal of physiology*, *117*(3), 380.

Åstrand, P. O., & Ryhming, I. (1954). A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during submaximal work. *Journal of applied physiology*, *7*(2), 218-221.

Alvero-Cruz, J. R., Parent Mathias, V., Garcia Romero, J., Carrillo de Albornoz-Gil, M., Benítez-Porres, J., Ordoñez, F. J., ... & Knechtle, B. (2019). Prediction of performance in a short trail running race: the role of body composition. *Frontiers in physiology*, *10*, 1306.

Balducci, P. (2017). *La place du coût énergétique dans les facteurs de performance en trail running* (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat, Laboratoire interuniversitaire de biologie de la motricité).

Barnes, K. R., & Kilding, A. E. (2015). Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports medicine-open*, *1*(1), 1-15.

Billat, L. V., & Koralsztejn, J. P. (1996). Significance of the velocity at VO₂max and time to exhaustion at this velocity. *Sports medicine*, *22*, 90-108.

Borg G. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc.* *14*,(5):377–81

Catlin, M. J., & Dressendorfer, R. H. (1979). Effect of shoe weight on the energy cost of running. *Med Sci Sports Exerc*, *11*, 80.

Chatterjee, T., Paul, S., Pramanik, A., Chowdhury, B., Pal, M. S., & Majumdar, D. (2015). Cardio-Respiratory and Metabolic Changes during Continuous Uphill-Downhill Load Carriage Task.

Daniels, J. T. (1985). A physiologist's view of running economy. *Medicine and science in sports and exercise*, 17(3), 332-338.

Ehrström, S., Tartaruga, M. P., Easthope, C. S., Brisswalter, J., Morin, J. B., & Vercauysen, F. (2018). Short trail running race: beyond the classic model for endurance running performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 50(3), 580-588.

Frederick, E. C., Howley, E. T., & Powers, S. K. (1980, January). LOWER O₂ COST WHILE RUNNING IN AIR-CUSHION TYPE SHOE. In *Medicine and Science in Sports and Exercise* (Vol. 12, No. 2, pp. 81-82). 351 WEST CAMDEN ST, BALTIMORE, MD 21201-2436: WILLIAMS & WILKINS.

Ingjer, F. (1991). Factors influencing assessment of maximal heart rate. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 1(3), 134-140.

Jones, B. H., Toner, M. M., Daniels, W. L., & Knapik, J. J. (1984). The energy cost and heart-rate response of trained and untrained subjects walking and running in shoes and boots. *Ergonomics*, 27(8), 895-902.

Keren, G., Epstein, Y., Magazanik, A., & Sohar, E. (1981). The energy cost of walking and running with and without a backpack load. *European journal of applied physiology and occupational physiology*, 46(3), 317-324.

Lemire, M. (2019). *Optimisation de la performance en trail: Etude des réponses cardiorespiratoires et des facteurs de la performance en course en montée vs descente* (Doctoral dissertation, Strasbourg).

Martin, P. E. (1985). Mechanical and physiological responses to lower extremity loading during running. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 17(4), 427-433.

Martinez-Navarro, I., Montoya-Vieco, A., Collado, E., Hernando, B., & Hernando, C. (2020). Ultra trail performance is differently predicted by endurance variables in men and women. *International journal of sports medicine*.

Millet, G. Y., Hoffman, M. D., and Morin, J. B. (2012b). Sacrificing economy to improve running performance--a reality in the ultramarathon? *J. Appl. Physiol.* 113, 513–513. doi:10.1152/jappphysiol.00739.2012.

Minetti, A. E., Ardigo, L. P., & Saibene, F. (1993). Mechanical determinants of gradient walking energetics in man. *The Journal of physiology*, 472(1), 725-735.

Minetti, A. E., Ardigo, L. P., & Saibene, F. (1994). Mechanical determinants of the minimum energy cost of gradient running in humans. *Journal of Experimental Biology*, 195(1), 211-225.

Minetti, A. E., Moia, C., Roi, G. S., Susta, D., & Ferretti, G. (2002). Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes. *Journal of applied physiology*.

Mischler, I., Vermorel, M., Montaurier, C., Mounier, R., Pialoux, V., Péquignot, J. M., ... & Fellmann, N. (2003). Prolonged daytime exercise repeated over 4 days increases sleeping heart rate and metabolic rate. *Canadian journal of applied physiology*, 28(4), 616-629.

Looney, D. P., Santee, W. R., Hansen, E. O., Bonventre, P. J., Chalmers, C. R., & Potter, A. W. (2019). Estimating energy expenditure during level, uphill, and downhill walking. *Med Sci Sports Exerc*, 51(9), 1954-1960.

Pastor, F. S., Besson, T., Varesco, G., Parent, A., Fanget, M., Koral, J., ... & Millet, G. Y. (2022). Performance determinants in trail-running races of different distances. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 17(6), 844-851.

Pate RR. Physiological and anatomical correlates of running economy in habitual runners. *Med Sci Sports Exerc*. 1989;21 Suppl 2:S26.

Péronnet, F., Thibault, G., Rhodes, E. C., & McKenzie, D. C. (1987). Correlation between ventilatory threshold and endurance capability in marathon runners. *Medicine and science in sports and exercise*, 19(6), 610-615.

Praz, C., Jagdeep, S., Praz, M., & Dériaz, O. (2011). Coût énergétique de la course en montée et en descente chez les coureurs entraînés pour la course de montagne. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie*, 59(1), 40.

Saugy, J., Place, N., Millet, G. Y., Degache, F., Schena, F., & Millet, G. P. (2013). Alterations of neuromuscular function after the world's most challenging mountain ultra-marathon. *PloS one*, 8(6), e65596.

Scheer, V., Cramer, L., & Heitkamp, H. C. (2018). Running economy and energy cost of running with backpacks. *The Journal of sports medicine and physical fitness*, 59(4), 555-560.

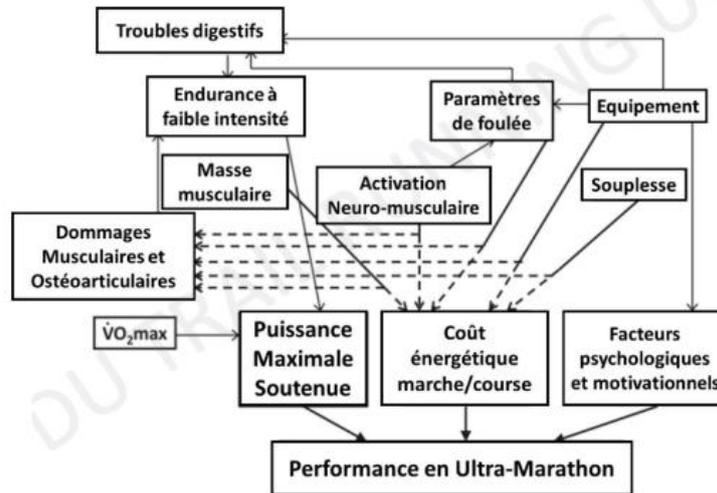
Scheer, V., Janssen, T. I., Vieluf, S., & Heitkamp, H. C. (2019). Predicting trail-running performance with laboratory exercise tests and field-based results. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 14(1), 130-133.

Swain, D. P., & Leutholtz, B. C. (1997). Heart rate reserve is equivalent to % VO₂ reserve, not to % VO₂max. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(3), 410-414.

Teunissen, L. P., Grabowski, A., & Kram, R. (2007). Effects of independently altering body weight and body mass on the metabolic cost of running. *Journal of Experimental Biology*, 210(24), 4418-4427.

Annexes :

Figure 1 : Facteurs associés à la performance en ultra-marathon (Millet et al 2012):



Equation 1 : Equation de Fick, 1855 :

$$\dot{V}O_{2max} = FC_{max} \cdot VES_{max} \cdot (CaO_2 - CvO_2)$$

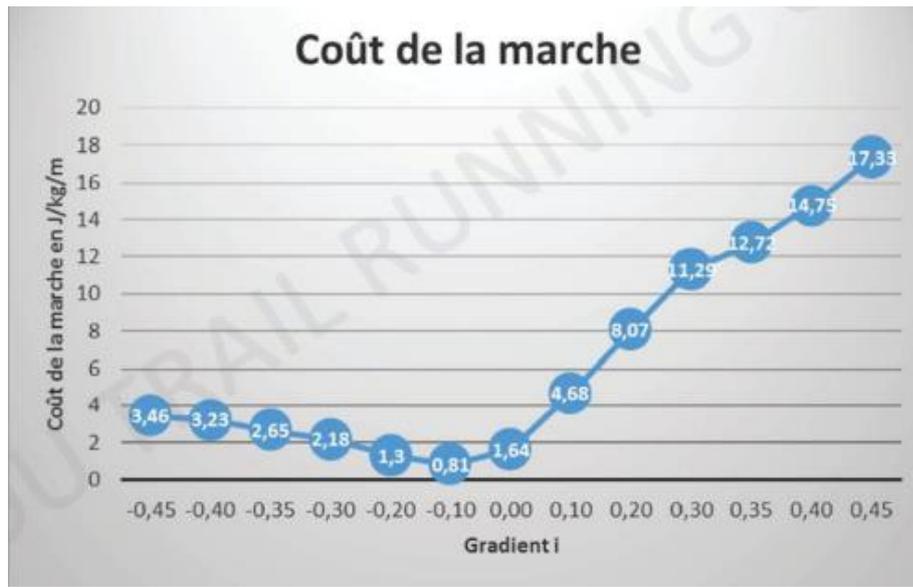
Consommation maximale d'oxygène : $\dot{V}O_2 max$, fréquence cardiaque maximale : FC_{max} , volume d'éjection systolique maximal : VES_{max} ainsi que la différence artérioveineuse de contenu en O_2 : $CaO_2 - CvO_2$

Figure 2 : Cout énergétique de la course selon le gradient de pente (Minetti, 2002) :



J = Joules
 m = Mètres
 i = Inclinaison de la pente

Figure 3 : Coût énergétique de la marche selon le gradient de pente (Minetti, 2002) :



J = Joules
 m = Mètres
 i = Inclinaison de la pente

Figure 4 : Economie de course chez des coureurs hommes et femmes de différents niveaux (Barnes & Kilding, 2015) :

Table 1 Normative running economy data for male and female runners of varying ability levels

Runner classification	Speed (km·hr ⁻¹)	Male mean (range)		Female mean (range)	
		Running economy (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	VO ₂ max (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	Running economy (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	VO ₂ max (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)
Recreational [19,77,202,220-223]	10	36.7 (35.4-38.8)	54.2 (51.0-57.8)	37.7 (32.8-42.6)	49.7 (45.2-54.1)
	12	42.2 (40.4-45.3)		43.2 (38.5-48.1)	
	14	47.4 (46.0-49.5)		47.3 (40.1-51.9)	
Moderatelytrained [94,224-229]	12	40.7 (37.4-48.1)	62.2 (56.6-69.1)	41.9 (28.9-41.7)	55.8 (50.5-59.4)
	14	46.8 (42.0-55.5)		47.9 (41.3-53.5)	
	16	51.4 (51.6-62.3)		52.9 (45.7-61.0)	
Highly trained [1,21,23,27,31,230,231]	12	n/a	70.8 (65.3-80.2)	41.3 (33.3-50.2)	61.7 (56.2-72.3)
	14	45.0 (32.4-56.5)		48.3 (39.0-56.7)	
	16	50.6 (40.5-66.8)		54.5 (46.2-61.9)	
	18	58.1 (48.0-72.0)		58.6 (54.4-67.1)	
	20	66.5 (65.7-71.6)		n/a	
Elite [21,22,29,31,58,232]	14	39.9 (36.1-44.5)	75.4 (68.2-84.1)	41.9 (38.7-46.9)	66.2 (61.1-74.2)
	16	47.9 (43.2-53.4)		48.9 (45.1-55.8)	
	18	55.9 (50.5-62.3)		56.1 (51.8-63.8)	
	20	63.91 (57.5-71.2)		n/a	

n/a = not applicable.

Equation 2 : Equation de la dépense énergétique de la marche (Looney & al, 2019) :

$$EE = 1,44 + 1,94S^{0,43} + 0,24S^4 + 0,34SG(1-1,05^{1-1,1G+32})$$

Où EE représente la dépense énergétique de la marche en W·kg⁻¹, S représente la vitesse en m·s⁻¹, G représente la pente en %.

Figure 5 : Protocole expérimental de Teunissen (2007)

Table 1. Summary of experimental trials

Trial	Day 1	Day 2
1	Unloaded standing	Unloaded standing
2	100% BM and 100% BW	100% BM and 100% BW
3	100% BM and 75% BW fixed	110% BM and 110% BW
4	100% BM and 50% BW fixed	120% BM and 120% BW
5	100% BM and 25% BW fixed	130% BM and 130% BW
6	100% BM and 25% BW trolley	130% BM and 100% BW
7	100% BM and 50% BW trolley	120% BM and 100% BW
8	100% BM and 75% BW trolley	110% BM and 100% BW

BM, body mass; BW, body weight; fixed, fixed pulley method; trolley, rolling trolley method.

BM : Masse corporelle

BW : Poids corporel

Fixed : Système de tractation par poulie

Trolley : Système de délestage par chariot

Figure 6 : Echelle de perception de l'effort, échelle de Borg modifiée (1982)

ECHELLE DE BORG (0-10)

