

UNIVERSITE DE LAUSANNE

Faculté des Sciences Sociales et Politiques – SSP

Institut des Sciences du Sport de l'Université de Lausanne

Session Hiver 2018

THE EFFECTS OF HYPOXIA ON REPEATED JUMPS

MÉMOIRE DE MASTER EN SCIENCES DU MOUVEMENT ET DU SPORT

ORIENTATION ENTRAINEMENT ET PERFORMANCE

Présenté par **Pedro Leal**

Janvier 2018

Soutenu le 30 Janvier 2018

Directeur du travail : M. **Grégoire Millet**

Expert : M. **Davide Malatesta**

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de mémoire, le professeur Grégoire Millet, pour m'avoir proposé ce défi qui me valorise et m'enrichit personnellement. Je le remercie aussi pour ses sages conseils et pour sa disponibilité lors de la réalisation de ce projet.

A Sarah Willis pour toutes les renseignements par rapport au fonctionnement de la chambre hypoxique et pour sa disponibilité pendant la récolte des données.

J'adresse également mes remerciements aux 16 sujets qui ont participé de façon volontaire à ce projet. Ils ont généreusement donné de leur temps tout en démontrant un intérêt et motivation irréprochables lors du protocole.

Je remercie finalement mon épouse pour tout le support accordé pendant la réalisation de ce projet.

Résumé

Introduction : La littérature rapporte que pour des mouvements courts et explosifs, comme le saut, la condition d'altitude simulée (hypoxie normobarique, NH) aiguë n'altère pas les valeurs des variables mécaniques, comme la force (F), la vitesse (V) et la puissance (P), au contraire de l'altitude réelle (hypoxie hypobarique, HH) qui induit à des améliorations de ces valeurs. Lorsque ce type de mouvements sont répétés, la fatigue peut s'installer et jouer un rôle déterminant. Les objectifs de ce travail consistent à confirmer la littérature sur le saut isolé et à étudier les effets de la NH aiguë pendant un exercice de sauts de contre-mouvement (CMJ) répétés. Il s'agit de relever les variations des valeurs des variables récoltées, notamment celles des puissances produites dans différentes conditions d'altitude.

Méthode : 16 sujets masculins (25.3 ± 6.6 ans ; 1.84 ± 0.08 m ; 77.8 ± 7.1 kg), joueurs amateurs de sports collectifs divisés en trois groupes qui ont passé de façon randomisée et aveugle par les trois conditions d'altitude aiguë, normoxie (N ; $FiO_2 = 20.9\%$ ~ niveau de la mer), hypoxie modérée (MH ; $FiO_2 = 16.9\%$ ~ 2000m) et hypoxie sévère (SH ; $FiO_2 = 12.9\%$ ~ 3800m). Après un échauffement standardisé les sujets ont réalisé 5 CMJ isolés à des différentes charges : sans charge, 20, 40, 60 et 80% du poids du corps (BW). Ultérieurement les sujets ont réalisé 2 séries de 20 CMJ en 1 minute sans charge et à 30% BW. L'appareil Myotest a été utilisé pour la récolte des données de F, V et P.

Résultats : Pour les sauts isolés aucune différence a été relevée dans la même charge sur les valeurs de F, V et P à des différentes conditions. En ce qui concerne les sauts répétés, les moyennes de puissance (MP) ainsi que de l'indice de fatigue (IF) n'ont pas été différentes entre les conditions d'altitude sans charge et à 30% BW. Cependant, en SH une différence significative a été repérée entre la condition sans charge et 30% BW sur l'IF. Seulement à 30% BW la lactatémie a été différente entre SH et MH et le RPE a été différent entre SH et N.

Conclusion : Les résultats obtenus pour les sauts isolés confirment la littérature revue en mettant en évidence que ce n'est pas le manque d'oxygène qui impacte les actions, brèves et explosives. Pour les sauts répétés, il semble que les altitudes suggérées n'étaient pas en mesure de créer un manque d'O₂ au niveau central suffisant pour impacter les puissances produites et par conséquent l'IF. En SH, une charge de 30% BW semble induire un stress métabolique plus conséquent lors d'un exercice de sauts répétés.

Abstract

Introduction: Literature reports that for short and explosive movements, such as jumping, the acute simulated altitude condition (normobaric hypoxia, NH) does not alter the values of mechanical variables, such as force (F), speed (V) and the power (P), unlike the real altitude (hypobaric hypoxia, HH) that induces improvements in these values. When this type of movement is repeated, fatigue can settle and play a determining role. The objectives of this work is to confirm the literature referent to short and explosive movements and to study the effects of acute NH during a repeated counter-movement jump (CMJ) exercise. It is necessary to note variations in the values of the harvested variables, in particular the power produced at different altitude conditions.

Method: 16 male subjects (25.3 ± 6.6 years old, 1.84 ± 0.08 m, 77.8 ± 7.1 kg) amateur team sports players were divided into three groups that went from random to blind for the three conditions of acute altitude, normoxia (N; $FiO_2 = 20.9\%$ - sea level), moderate hypoxia (MH; $FiO_2 = 16.9\% \sim 2000m$) and severe hypoxia (SH; $FiO_2 = 12.9\% \sim 3800m$). After a standardized warm-up, the subjects will perform 5 isolated CMJs at different loads; without load, 20, 40, 60 and 80% of the weight of the body (BW). Subsequently subjects performed 2 sets of 20 CMJ in 1 minute without load and at 30% BW. The Myotest device was used to collect F, V and P data.

Results: In the isolated jumps no difference was found in the same load on the values of F, V and P under different conditions. In the case of repeated jumps, the power averages (MP) as well as the fatigue index (IF) were not different between altitude conditions on no-load and 30% BW. However, in SH a significant difference was found between the no-load condition and 30% BW for the IF. Only at 30% BW lactate was different between SH and MH and the RPE was different between SH and N.

Conclusion: The results on isolated jumps confirm the reviewed literature by highlighting that is not the lack of oxygen that impacts brief and explosive actions. On repeated jumps, it seems that the suggested altitudes were not able to create a lack of O_2 necessary at the central level to impact the powers produced and consequently the IF. In SH, a load of 30% BW seems to induce a greater metabolic stress during exercise of repeated jumps.

Abréviations

1RM : une répétition maximale

ANOVA : analyse de la variance

BFR : entraînement en occlusion

BW : poids corporel

CMJ : saut de contre-mouvement

CNS : système nerveux central

CSA : surface de section transversale

ECC : couplage excitation-contraction

F : force

F_0 : force maximale théorique à vitesse nulle

FC : fréquence cardiaque

F_iO_2 : fraction d'oxygène dans les gaz inspirés

F-V : relation force vitesse

HH : hypoxie hypobarique

IF : indice de fatigue

IHRT : entraînement contre-résistance en hypoxie intermittente

MH : hypoxie modérée

MP : moyenne de puissance

MVC : contraction musculaire volontaire

N : normoxie

NH : hypoxie normobarique

O_2 : oxygène

P : puissance

P_0 : puissance maximale théorique

PB : pression barométrique

P_iO_2 : pression partielle en oxygène

PP : puissance maximale

RPE : échelle de perception de la difficulté de l'effort de Borg

RT : entraînement de contre résistance

RTH : entraînement de contre-résistance en hypoxie

S_aO_2 : saturation artérielle en oxygène

SH : hypoxie sévère

SJ : saut de squat

SL : niveau de la mer

S_pO_2 : saturation pulsative en Oxygène

V : vitesse

V_0 : vitesse maximale théorique à force nulle

WR : résistance portable

WRT : entraînement avec de la résistance portable

Table des matières

| | |
|---|----|
| 1. Introduction | 13 |
| 1.1 L'entraînement contre-résistance | 13 |
| 1.1.1 Explication physiologique | 15 |
| 1.1.2 La relation Force-vitesse..... | 16 |
| 1.2 La fatigue | 18 |
| 1.3 L'entraînement avec charge additionnelle | 21 |
| 1.4 L'hypoxie | 23 |
| 1.4.1 La RTH (Resistance training in hypoxia) | 25 |
| 1.4.2 Explication physiologique | 27 |
| 1.4.3 L'hypoxie aiguë | 29 |
| 1.4.4 Puissance musculaire et hypoxie | 32 |
| 1.5 Intérêt de l'étude et hypothèses | 34 |
| 2. Méthodes | 36 |
| 2.1 Sujets | 36 |
| 2.1.1 Critère d'inclusion | 36 |
| 2.1.2 Critère d'exclusion..... | 36 |
| 2.1.3 Recrutement des sujets | 37 |
| 2.2 Le matériel | 37 |
| 2.2.1. Le Myotest | 38 |
| 2.2.2. Le gilet lesté..... | 39 |
| 2.3 Protocole expérimental | 39 |
| 2.3.1 Visite préliminaire | 40 |
| 2.3.2 Les séances expérimentales | 40 |
| 2.3.3 Le CMJ | 42 |
| 2.4 L'analyse des données | 43 |

| | |
|---|-----------|
| 2.5 Le traitement statistique | 44 |
| 3. Résultats | 45 |
| 3.1 Valeurs en repos | 45 |
| 3.2 Sauts isolés..... | 46 |
| 3.4 Sauts répétés..... | 51 |
| 4. Discussion | 60 |
| 4.1 Les sauts isolés | 60 |
| 4.2 Les sauts répétés | 62 |
| 4.3 Limites et forces du travail | 66 |
| 4.4 Perspectives | 68 |
| 5. Conclusion..... | 69 |
| 6. Références | 70 |
| 7. Annexes | |

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 - Facteurs métaboliques concernées dans l'hypertrophie musculaire. Figure tirée de Feriche et al. (2017)..... | 16 |
| Figure 2. L'état de l'art sur les combinaisons possibles d'entraînement en hypoxie. Figure tirée de Girard et al. (2017). | 25 |
| Figure 3. Mécanismes physiologiques induits par l'hypoxie lors des mouvements explosifs. Figure tirée de Feriche et al. (2017). | 29 |
| Figure 4. Protocole expérimentale d'une session. | 42 |
| Figure 5: Puissances produites en condition de normoxie à 0, 20, 40, 60 et 80% BW. * p<0,05, *** p <0,001 pour différences avec 0% BW..... | 46 |
| Figure 6: Puissances produites en condition d'hypoxie modéré à 0, 20, 40, 60, 80% BW. *** p <0,001 pour différences avec 0% BW..... | 47 |
| Figure 7: Puissances produites en condition d'hypoxie sévère à 0, 20, 40, 60, 80% BW. *** p <0,001 pour différences avec 0% BW..... | 47 |
| Figure 8 : Moyennes de la RPE sur les sauts isolés. * p < 0.05, *** p < 0.001 pour les différences entre conditions. | 49 |
| Figure 9 : Moyennes de la SpO ₂ après les sauts isolés à 0, 20, 40, 60, 80% BW. *** p < 0.001 pour les différences entre conditions. | 49 |
| Figure 10 : Moyennes de la FC après les sauts à 0, 20, 40, 60, 80 % BW. * p < 0.05, *** p < 0.001 pour les différences entre conditions. | 50 |
| Figure 11: Puissance Moyenne (MP) à 0 et 30% BW dans les conditions, N, MH et SH. | 51 |
| Figure 12: Puissance Maximale (PP) à chaque saut dans les 3 conditions, N, MH et SH.* p<0.05, *** p<0.001 pour différences avec 2 ^{ème} saut dans la série N ; # p<0.05, ### p<0.001 pour différences avec 2 ^{ème} saut dans la série MH ; \$ p<0.05, \$\$\$ p<0.001 pour différences avec 2 ^{ème} saut dans la série SH. | 52 |
| Figure 13: Puissance Maximale (PP) à chaque saut dans les 3 conditions, N, MH et SH. * p<0.05, *** p<0.001 pour différences avec 2 ^{ème} saut dans la série N ; # p<0.05, ### p<0.001 pour différences avec 2 ^{ème} saut dans la série MH ; \$ p<0.05, \$\$\$ p<0.001 pour différences avec 2 ^{ème} saut dans la série SH. | 52 |
| Figure 14 : Indice de fatigue sans charge selon les conditions d'altitude..... | 53 |
| Figure 15 : Indice de Fatigue (IF) à 30 % BW selon les 3 conditions, N, MH et SH..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figure 16 : Lactatémie après la série des sauts répétés sans charge. * $p < 0.05$ pour les différences entre conditions..... | 55 |
| Figure 17 : Lactatémie après la série des sauts répétés à 30 % BW. * $p < 0.05$ pour les différences entre conditions..... | 55 |
| Figure 18 : RPE après la série des sauts répétés sans charge | 56 |
| Figure 19 : RPE après la série des sauts répétés à 30 % BW. * $p < 0.05$, pour les différences entre conditions. | 57 |
| Figure 20 : SpO2 après la série de sauts répétés sans charge. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions..... | 57 |
| Figure 21 : SpO2 après la série des sauts répétés à une charge de 30 % BW. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions..... | 58 |
| Figure 22 : Fréquence cardiaque (FC) selon les 3 conditions, N, MH et SH sans charge. * $p < 0.05$ pour les différences entre conditions..... | 58 |
| Figure 23 : Fréquence cardiaque (FC) selon les 3 conditions, N, MH et SH à une charge de 30 % BW. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions..... | 59 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Revue de la littérature sur l'hypoxie à l'exposition aiguë. Tableau adapté de Feriche et al. (2017)..... | 31 |
| Tableau 2 : Valeurs au repos de SpO2, FC et lactate. * $p < 0,05$ pour des différences avec N ; *** $p < 0,001$ pour des différences avec N ; # $p < 0,05$ pour des différences entre SH et MH ; ### $p < 0,001$ pour des différences entre SH et MH. | 45 |
| Tableau 3: Valeurs moyennes et écarts type de F, V, P pour les charges de 0, 20, 40, 60 et 80% BW sur les conditions de N, MH et SH lors des CMJ isolés. | 48 |
| Tableau 4: Valeurs de moyennes de puissance (MP) et de puissance maximale (PP) à 0% BW et à 30% BW en N, MH et SH et valeurs de signifiante (p) | 53 |
| Tableau 5 : Valeurs d'Indice de Fatigue (IF) dans les 3 conditions, N, MH et SH à 0 % BW et à 30 % BW et valeurs de signifiante..... | 54 |
| Tableau 6 : Taux de lactate (mmol/l) à 0 et 30 % BW sur les conditions de N, MH et SH et valeur de signifiante..... | 56 |

1. Introduction

Au cours des dernières décennies, les méthodes d'entraînement ont beaucoup changé, soit dans leur structure, soit au niveau des matériaux utilisés, ou encore l'endroit de l'entraînement, et ce, toujours en cherchant à améliorer leur efficacité. En ce qui concerne l'entraînement de la force, la littérature scientifique a évolué et nous présente l'entraînement contre-résistance (*resistance training* - RT) comme la forme d'entraînement la plus efficace pour augmenter les capacités physiques. En outre, l'entraînement - en utilisant des résistances portables - a aussi fait son chemin dans les sciences du sport tout en appelant au caractère spécifique et fonctionnel de cette méthodologie. De la même manière, au fil des années, notamment depuis les Jeux olympiques de Mexico, en 1968, à 2 240 mètres d'altitude, la communauté scientifique s'intéresse aux bénéfices de l'altitude pour l'entraînement et essaye de mettre en pratique la connaissance théorique. Toutes ces méthodologies, et bien d'autres encore, ne cessent d'évoluer et d'interagir les unes avec les autres dans une quête de productivité. Ce mémoire va dans le sens d'aider à clarifier un peu plus ces dimensions.

1.1 L'entraînement contre-résistance

L'entraînement contre-résistance (*resistance training* ou RT) a été désigné comme le type d'entraînement le plus efficace pour faire progresser davantage les caractéristiques entraîna- bles de la condition physique musculaire (Kraemer et al., 2002). Ses conditions sont la force musculaire, l'hypertrophie musculaire, la puissance musculaire, l'endurance musculaire locale et la performance motrice (Kraemer et al., 2002). Sont à considérer pour la meilleure compréhension de ce mémoire, la force musculaire, la puissance musculaire et la performance motrice.

La force musculaire se définit comme la capacité du système neuromusculaire à générer la force nécessaire pour tout type de mouvement (Kraemer et al., 2002). La surface de section transversale (*cross-sectional area* ou CSA) des fibres musculaires a une relation linéaire avec la capacité à produire de la force (Finer et al., 1994). À un niveau supérieur, l'angle de pennation des fibres musculaires dans un muscle, ainsi que la longueur du muscle en soi, l'angle d'articulation et la vitesse de contraction peuvent influencer sur la capacité à produire de la force (Gulch, 1994 ; Knapik et al., 1983 cités par Kraemer et al., 2002). Cependant, la production de force est toujours dépendante de l'activation des unités motrices (Sale, 1992 cité par Kraemer et al., 2002). Cette activation mise en route par le système neuromusculaire fonctionne selon le

principe de la taille (Henneman et al., 1965), en ce que les unités motrices sont recrutées en fonction de leur taille, c'est-à-dire d'abord les plus petites (moins de force à générer), et puis les plus grosses (plus de force à générer).

La puissance musculaire est une dimension physique très importante pour la performance sportive (Kraemer et al., 2002). Le concept de puissance musculaire s'explique par la présence de la force (F) et de la vitesse (V) ($P = F \times V$) ; une plus grande puissance est donc produite quand la même quantité de travail est complétée dans une période de temps plus court (augmentation de la vitesse) ou quand une quantité plus grande de travail (augmentation de la force) est complétée dans le même intervalle de temps (Kraemer et al., 2002). Kramer et al. (2002) réfère que la production de la puissance au niveau d'un muscle à la contribution neuromusculaire ne peut que s'expliquer par : a) le taux maximal de développement de la force (Häkkinen et Komi, 1985) ; b) la force musculaire à des vitesses de contraction lentes et rapides (Kaneko et al., 1983 cités par Kraemer et al., 2002) ; c) l'efficacité du cycle étirement-raccourcissement (Bosco et Komi, 1979 cités par Kraemer et al., 2002) ; d) la coordination des patrons et habilités motrices (Schmidtbleicher, 1992 ; Young et al., 1998 cités par Kraemer et al., 2002).

L'entraînement contre-résistance a des effets sur la performance motrice, et ceux-ci ont été exposés dans plusieurs articles (Kraemer et al., 2002). Le principe de la spécificité semble être important pour améliorer la performance de différentes habilités motrices ; d'ailleurs, des améliorations plus significatives sont observées lorsque la planification de l'entraînement en musculation est faite en fonction de la tâche (Kraemer et al., 2002). La performance motrice peut être évaluée au travers des sauts verticaux, de la vitesse de sprint et encore selon des activités sportives spécifiques. Dans le domaine de ce projet, le saut vertical constitue un point important, notamment le saut de contre-mouvement (CMJ). Le saut vertical est l'une des habilités motrices la plus répandue pour l'évaluation de la production de force / puissance, en sachant que divers protocoles ont été élaborés. Le saut vertical est une action motrice très importante parmi de nombreux sports, qu'ils soient collectifs ou individuels. La performance du saut vertical est affectée par la relation complexe entre plusieurs facteurs, tels que la production de force, le taux de développement de la force et la coordination neuromusculaire entre le haut du corps et le bas du corps (McLellan et al., 2011). L'entraînement de saut en contre-résistance permet une plus grande production de force rapide en permettant une augmentation de la charge à surmonter (Janssen et al., 2012). Il a été rapporté que faire des sauts en ayant une charge augmente le recrutement des fibres musculaires et aussi le niveau de

l'activation neurale, ce qui résulte en une plus grande puissance produite (Faccioni, 1994) et en une augmentation de la performance du saut (Newton et al., 1999). La production de force musculaire est positivement corrélée à la hauteur en saut vertical (Kraemer et al., 2002). De plus, plusieurs études ont rapporté des améliorations significatives du saut vertical après un entraînement contre-résistance (Adams, 1992 ; Baker et Nance, 1999 cité par Kraemer et al., 2002). Les exercices multi-articulaires semblent améliorer la capacité à sauter (Garhammer et Gregor, 1992 ; Young, 1993) ; la vitesse élevée et la capacité articulaire adjacente à ce type d'exercices et leur capacité à intégrer la force, la puissance et la coordination musculaire, favorisent un transfert direct pour améliorer la performance du saut (Kraemer et al., 2002). Certaines études (Häkkinen et Komi, 1985 ; Wilson et al., 1993) ont montré des gains significatifs du saut en utilisant des charges légères (<60%) d'une répétition maximale (1RM), ce qui favorise la théorie de l'entraînement balistique à haute vitesse, tandis que d'autres études (Adams, 1992 ; Young, 1993) ont observé des gains au saut vertical après l'entraînement à des charges plus élevées (>80% 1RM). Les programmes d'entraînement multi-séries sont préférables aux programmes mono-séries pour augmenter la performance d'un saut vertical (Kraemer et al., 1997, cité par Kraemer et al., 2002). La fréquence d'entraînement en musculation semble aussi avoir un effet sur la performance du saut ; chez les jeunes universitaires joueurs de football américain, la performance du saut est sensiblement améliorée chez ceux qui faisaient 5-6 séances d'entraînement par semaine par rapport à ceux qui n'en faisaient que 3-4 (Hoffman et al., 1990).

1.1.1 Explication physiologique

Suite à un entraînement contre-résistance, les potentiels mécanismes qui sont à l'origine des adaptations morphologiques sont les suivants : a) le recrutement additionnel et préférentiel des fibres musculaires rapides (*fast-twitch*) ; b) une acidose métabolique prolongée à cause de l'accumulation intramusculaire des protons (ions H⁺) et à la successive stimulation des méta-récepteurs ; c) une augmentation de l'expression du facteur de croissance et de la signalisation intracellulaire dues à des différences dans la mécanique contractile du muscle et la déformation sarcolemmique induites par la pression externe ; d) les adaptations métaboliques de la filière anaérobie lactique (*fast glycolytic system*) provoquées par une ischémie au niveau musculaire ; e) une croissance des tissus provoquée pour la production des radicaux libres (*reactive oxygen species* ou ROS) ; f) une hyperémie réactive induite par gradient après élimination de la pression externe, ce qui provoque un gonflement intracellulaire et étire les

structures cytosquelettiques qui favorisent la croissance tissulaire ; g) l'activation des cellules satellites (Pope et al., 2013). Cependant, le stress métabolique induit par l'exercice déclenche des adaptations morphologiques et, par conséquent, les gains sur les caractéristiques entraînaibles de la condition physique musculaire. L'ischémie au niveau musculaire semble être à l'origine des changements métaboliques qui favorisent le métabolisme anaérobie lactique (Pope et al., 2013). La modulation de l'apport en O₂ peut donc favoriser et/ou stimuler l'anabolisme et la synthèse protéique intramusculaire. C'est à partir de ce principe que les chercheurs ont raisonné l'entraînement de résistance en condition d'hypoxie. En accord avec cela, l'entraînement modéré en résistance sous conditions d'hypoxie améliore les mécanismes de stress métabolique induits par l'exercice (Feriche, et al., 2017). L'image ci-dessous illustre les facteurs métaboliques concernés dans l'hypertrophie musculaire.

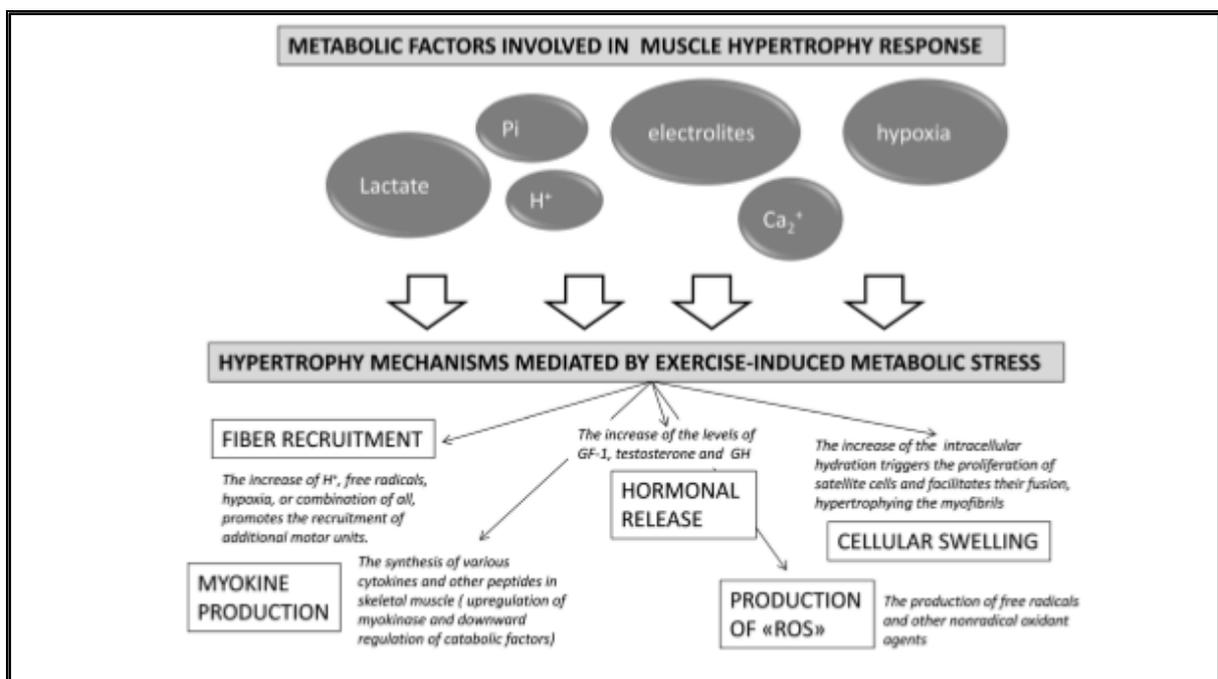


Figure 1 - Facteurs métaboliques concernés dans l'hypertrophie musculaire. Figure tirée de Feriche et al. (2017)

1.1.2 La relation force-vitesse

Des mouvements balistiques, surtout le saut, ont été étudiés pour comprendre les limites mécaniques de la fonction musculaire (Samozino et al., 2012), et pour les expliquer, la relation Force-vitesse (F-V) a été souvent utilisée comme méthode scientifique. Dans le cadre de ce mémoire, c'est justement le saut qui est tout particulier étudié, d'où l'intérêt de comprendre les principes de cette relation.

La capacité d'accélérer une masse est primordiale pour ce genre de mouvements dits explosifs. Pour accélérer une masse, de façon à ce qu'elle atteigne une vitesse la plus élevée possible, la puissance devient un élément très important. Spécifiquement, dans le saut, il est primordial que le centre de gravité du corps atteigne la vitesse la plus élevée au moment où les pieds quittent le sol (Samozino et al., 2012). En accord avec la deuxième loi du mouvement de Newton, cette vitesse dépend directement de l'impulse mécanique subie dans la direction du mouvement (Markovic et Jaric, 2007). La capacité à développer une impulsion haute semble être connectée à des capacités de puissance du système neuromusculaire observées dans le mouvement (Samozino et al., 2012). Comme expliqué ci-dessus, la puissance résulte du produit de la force sur la vitesse ; en revanche, la manière d'atteindre la puissance la plus élevée (P_{max}) est encore sujet à débat, à travers le développement des niveaux de force élevés à vitesses basses (capacités de force) et/ou à travers les niveaux de force basses et vitesses élevées (capacités de vitesse) (Samozino et al., 2012).

La capacité mécanique dynamique des membres inférieurs a bien été décrite par la relation linéaire inverse de F-V et par la relation parabolique puissance-vitesse (P-V) lors des mouvements concentriques d'extension, comme les cas du *squat jump* (SJ) ou du saut de contre-mouvement (CMJ). En conséquence de ces relations, il est possible de saisir la force maximale théorique à une vitesse nulle (F_0), la puissance maximale (P_{max}) et la vitesse maximale théorique à une force nulle (V_0). Ces trois paramètres représentent les capacités maximales mécaniques des membres inférieurs pour générer force, puissance et vitesse respectivement, et enfin, les limites mécaniques de toute la fonction neuromusculaire (Samozino et al., 2012). Cela dit, les propriétés individuelles mécaniques du muscle (F-V intrinsèque, relation entre raideur et compliance et le taux de développement de la force), les facteurs morphologiques (CSA, longueur de fascicule musculaire, angle de pennation, et propriétés de tendon) et mécanismes neuraux (recrutement des unités motrices, fréquence de décharge, synchronisation des unités motrices et coordination intermusculaire) influencent la puissance musculaire maximale (Cormie et al., 2011). La relation entre les trois paramètres, P, F et V, peut être décrite selon l'équation mathématique suivante (Samozino et al., 2012) :

$$P_{max} = \frac{F_0 V_0}{4}$$

Par conséquent, deux athlètes avec la même puissance maximale théorique (P_0) peuvent avoir des valeurs de F_0 et V_0 différents et, naturellement, des relations F-V également différentes. De ce fait, il s'observe que deux sujets avec la même P_0 peuvent s'appuyer plutôt sur des qualités

de F ou de V pour atteindre leur puissance maximale (Samozino et al., 2012). Cela dit, la P_{\max} n'est pas la seule propriété musculaire impliquée dans la performance du saut vertical. Pour chaque P_{\max} donnée, il y aura une relation F-V optimale que peut maximiser la performance du saut (Samozino et al., 2012).

1.2 La fatigue

La fatigue est un phénomène assez complexe qui peut être décrit comme la perte de la capacité à générer de la force, ou l'incapacité de soutenir la qualité d'un exercice plus longtemps (Strojnik et Komi, 1998). En outre, la fatigue induite par l'exercice est définie comme l'incapacité réversible du système neuromusculaire de maintenir une force et/ou une puissance. (Amann et Calbet, 2008). La fatigue est divisée d'une façon classique en périphérique et centrale. La fatigue périphérique comprenant les processus entre la jonction neuromusculaire et les structures distaux est causée par l'altération des potentiels d'action, l'altération du couplage excitation-contraction (*excitation-contraction coupling* ou ECC) ou de l'altération de la formation des points actine myosine. La fatigue périphérique est influencée par l'apport d' O_2 aux muscles actifs en changeant le métabolisme intra-cellulaire. Ce facteur altère le taux d'accumulation de métabolites, tels que le lactate, H^+ ou les phosphates ce qui va diminuer l'efficacité du ECC. L'ECC a été identifié comme le mécanisme principal responsable pour la perte de tension musculaire pendant le processus de fatigue car il inhibe directement l'appareil contractile et perturbe la libération de Ca^{2+} par le réticulum sarcoplasmique (Amann et Calbet, 2008). Bien que la vitesse de développement de la fatigue périphérique soit plus rapide avec un apport réduit en O_2 au muscle actif, le mécanisme sous-jacent principal de la fatigue (perturbations de l'ECC par diminution de la libération de Ca_2 et inhibition de l'appareil contractile) est le même soit en conditions de l'hypoxie soit en l'hyperoxie (Amann et Calbet, 2008).

La fatigue centrale comprenant les processus de la jonction neuromusculaire jusqu'aux structures centrales est attribuée à une diminution de l'activation nerveuse (Amann et Calbet, 2008). En effet, elle a été définie comme le résultat de changements au niveau extracellulaire, au niveau des neurotransmetteurs ou au niveau de changements induits par l'exercice sur le système neurotransmetteur. (Amann et Calbet, 2008).

Désormais, d'autres chercheurs ont développé une vision plus complexe de la fatigue, en ce qu'elle n'est pas seulement un phénomène physiologique mais incorpore aussi des sensations

du sujet. En effet, la fatigue pourrait être envisagée comme un mécanisme de sécurité, modulé par des sensations centraux et périphériques, qui empêche les crises métaboliques et préserve l'intégrité des muscles (Sargeant, 1994), à travers la réduction de l'intensité ou encore la fin de l'exercice (Noakes 1998). Dans ce modèle plus complexe la fatigue apparaît pour avoir un rôle de modulateur de l'intensité de l'exercice.

Des facteurs extérieurs à l'être humain peuvent aussi permettre à la fatigue de se manifester, notamment la température (Cabanac, 1975), l'hypoxie (Amann et al., 2007), la déshydratation (Gauchard et al., 2002), le manque d'apport énergétique (Costil et Hargreaves, 1992), pour n'en citer que quelques-uns.

La fonction musculaire pendant l'entraînement de résistance avec des niveaux d'hypoxie très haut peut être influencé par la présence d'un gouverneur central. Cette théorie postulée par Noakes et al. (2001) met en évidence le fait que le niveau de recrutement des unités motrices par le système nerveux central (*central nervous system* ou CNS) est déterminé par la nécessité du cerveau de se protéger à soi-même et au reste du corps de façon à assurer sa survie et son intégrité pendant un exercice (Millet et al., 2009). Cela dit, l'idée d'un seuil hypoxique à partir duquel une réduction de la commande centrale survient (Scott et al., 2014) est une hypothèse qui a été investiguée ces dernières années.

En sachant que le CNS est très sensible au manque d'O₂, la fatigue centrale peut être développée suite à une baisse d'oxygénation cérébrale, comme une réponse rapide pour maintenir l'homéostasie (Amann et Calbet, 2007). Dans la revue sur les mécanismes de la fatigue, Amann et Calbet (2007) réfèrent que la capacité pour générer puissance et force pendant de brefs moments reste inchangeable en hypoxie sévère aiguë et chronique. Désormais, une étude récente vient montrer le contraire (Rasmussen et al., 2007), dans cette étude, la contraction volontaire maximale (*maximum voluntary contraction* ou MVC) de la main a diminué en hypoxie sévère aiguë (F_iO₂ = 0.10). Il existe donc des contradictions dans la littérature sur ce thème, mais une relation proche entre la fatigue périphérique (changements biochimiques intra-musculaires) et la régulation de la commande centrale via un feedback afférent peut être la clé pour expliquer la régulation de l'intensité d'un effort (Amann et Dempsey, 2008). De plus, dans le même travail, Amann et Dempsey (2008) ont proposé que la magnitude du feedback inhibiteur est proportionnelle au pourcentage du développement de la fatigue musculaire périphérique, ce processus est également sensible et proportionnel au manque d'O₂. Néanmoins, l'exactitude de comment ce processus se développe n'est pas encore claire à nos jours.

Dans leur recherche, Amann et al. (2007), ont conclu que la fatigue musculaire périphérique est le plus grand déterminant de la performance en normoxie et hypoxie aiguë modérée ($F_{iO_2} = 0.15$). En revanche, dans une condition d'hypoxie sévère aiguë, le CNS précède le développement d'état de fatigue et est dominant sur la décision de diminuer le travail produit et/ou de terminer l'exercice. En outre, dans la même étude, les chercheurs font référence à une valeur entre 70-75% S_aO_2 comme un seuil en dessous duquel la prédominance de la fatigue due à l'hypoxie du SNC influence davantage la diminution de la capacité travail et, par conséquent, la performance. Dans un autre travail Amann et Kaiser (2008) ont avancé que pour les actions isolées, brèves et puissantes (5 s plus 3-5 min de récupération) il serait possible d'observer des anomalies à travers de l'électromyographie dans les muscles concernés à des niveaux de S_aO_2 au tour de 82%, par contre à des niveaux de F_{iO_2} supérieurs (13 et 16%) les effets n'étaient pas observés.

Mais comment quantifier la fatigue ? Différentes méthodes ont été tentées pour la quantifier. Pour évaluer la fonction neuromusculaire, des mesures sont faites avant et immédiatement après un effort suffisamment fatiguant. Pour ce faire sont utilisés les tests de MVC pour la fatigue périphérique et des manœuvres de force évoquées pour trouver la fatigue centrale. Pour déterminer le développement de la fatigue centrale et périphérique pendant l'exercice, l'électromyographie (EMG) est souvent utilisée. Dans le cas de la fatigue périphérique, l'activité EMG subit une augmentation progressive dans le temps, probablement pour compenser les faiblesses musculaires périphériques, tandis qu'en cas de fatigue centrale, une chute de la force ou de la puissance musculaire est secondaire à une réduction centralisée de la commande motrice (réduction de l'activité EMG), ce qui entraîne une réduction du recrutement des unités motrices. Finalement, le taux de développement de la fatigue a été estimé au moyen du temps d'échec de la tâche, c'est-à-dire, le moment où l'échec de maintenir une force, une puissance donnée ou une tâche motrice se produit (Amann et Calbet, 2008). La capacité à répéter des efforts à haute puissance ou à des vitesses de sprint élevées est une composante clé pour une bonne partie des sports collectifs ou de raquettes (Glaister et al., 2008). La manière d'évaluer ce genre d'efforts ou d'autres avec la même typologie (≤ 20 répétitions ; ≤ 10 s d'effort ; ≤ 60 s de repos) est basée sur deux types des tests : a) mesurer la vitesse maximale ou la puissance maximale attendue pour le sujet et b) mesurer la capacité pour résister à la fatigue et pour maintenir une haute performance tout le long du test (Glaister et al., 2008). Comme réponse à une croissante utilisation de ce genre des protocoles expérimentaux, notamment pour la répétition des sprints, Glaister et al (2008) ont fait une évaluation de la fiabilité et de la

validité des huit mesures de fatigue les plus utilisées et ont mis en évidence la mensuration du pourcentage de décroissance de Fitzsimons (Fitzsimons et al., 1993 cité par Glaister et al., 2008).

1.3 L'entraînement avec charge additionnelle

Pendant des années, de nombreuses méthodes d'entraînement ont été mises en place par des entraîneurs sportifs pour améliorer la biomécanique et l'efficacité du saut vertical : l'entraînement de résistance, la plyométrie, l'entraînement en traction/poussée ainsi que l'utilisation des vestes ou manches lestées (Macadam et al., 2016).

L'entraînement avec de la résistance portable (*Wearable resistance training* ou WRT) est une nouvelle méthode d'entraînement de surcharge sur le saut vertical ou le *sprint* sans perte de qualité de la biomécanique naturelle du mouvement (Macadam et al., 2016). Le WRT consiste à avoir des charges externes attachées à quelques parties du corps pendant l'entraînement d'un sport déterminé (Macadam et al., 2016), avec l'objectif d'augmenter la puissance dégagée et la performance pendant l'exécution des mouvements spécifiques à chaque sport, sans perte au niveau de la qualité de l'action exécutée (Hrysomallis, 2012). L'entraînement utilisant de la résistance portable (*Wearable resistance* ou WR) est particulièrement bénéfique pour les athlètes pour lesquels les mouvements explosifs du bas du corps sont requis soit à l'entraînement soit en compétition (Macadam et al., 2016). L'objectif de ce genre d'entraînement sera de stimuler la performance au travers d'une surcharge externe capable de promouvoir les plus grandes adaptations neuromusculaires en relation à l'action spécifique de chaque sport, c'est-à-dire, de mettre en place le principe de la spécificité (Macadam et al., 2016). L'entraînement de résistance à charges lourdes (>80% 1RM), fait à des vitesses basses ou modérées, est indiqué pour le développement de la force (Häkkinen et Komi, 1985 ; Harris, GR., et al, 2000 ; Newton, RU., et al, 1999 ; Wilson et al, 1993). Cependant, il est moins indiqué pour l'augmentation de la puissance, qui demande plus de vitesse dans le mouvement à des charges moindres (<60% 1RM) (Häkkinen et al., 1985 ; Harris et al., 2000 ; Newton et al., 1999). En contradiction, le WRT permet que l'accélération du mouvement se produise tout au long de l'angle du mouvement, ce qui devient très spécifique (Newton et al, 1999). Donc, le WRT offre une résistance accrue à l'entraînement sans charge de l'athlète et fournit ainsi une surcharge du système musculaire, ce qui peut amener une adaptation à l'entraînement et engendrer une augmentation de la performance sportive (Hrysomallis, 2012). Ainsi, le WRT

essaie d'identifier la charge optimale pour conduire à des gains importants sans se traduire en une perte de la technique de mouvement (Macadam et al, 2016). En outre, le placement des charges est sujet à discussion, ainsi que les charges à utiliser, soit pour le tronc, entre 5 à 65% du poids du corps (*body weight* ou BW), soit pour les membres, moins de 10% BW. Des études précédentes ont utilisé le gilet lesté pour réaliser des sauts avec des gammes de charges très larges. Très peu d'études ont été réalisées avec des charges plus grandes que 30% BW. D'ailleurs, selon la force des sujets, la charge externe qui leur permet encore de sauter peut être comprise entre 30 à 40% de leurs BW (Markovic et al., 2013). D'après la revue faite par Macadam et al. (2016), avec une utilisation aiguë d'un gilet lesté, les charges maximales dans les protocoles utilisant les sauts ont été de 11.4% BW (30% BW pour des protocoles utilisant la course et 21.8% BW en protocoles de sprint), tandis que dans les études longitudinales, une charge de 30% a été utilisée pour un protocole concernant le SJ et le CMJ.

La littérature concernant la relation entre les vestes lestées et les sauts n'est pas vaste. Au niveau aigu : pour des athlètes expérimentés, l'addition d'une charge de ~11% BW ne traduit pas une différence significative sur la raideur musculaire ni sur des mesures biomécaniques, tel que l'angle de mouvement des chevilles, genoux et tronc, quand elles sont comparées avec la condition sans charge lors d'un saut de *block* au volleyball. La seule différence significative a été repérée sur la hauteur du saut (-10.6%) et sur la flexion des hanches (-7.3%) (Janssen et al., 2012) ; avec une charge de 6.6-13.3% BW, des différences significatives ont été trouvées sur la force maximale lors d'un SJ (Driss et al., 2001) ; avec l'utilisation d'un gilet lesté (11% BW) les mêmes chercheurs, Driss et al (2001), n'ont pas trouvées des différences significatives de la force au sol (*Ground force*) dans une population des joueurs de volleyball lors du CMJ ; au contraire lors d'un *drop jump*, des différences significatives ont été trouvées sur la force au sol entre une population chargée (~11.5% BW) et une autre sans charge (Fowler et al., 1994, cité par Macadam et al., 2016) ; relativement à la production de Puissance (P), plus celle-ci a descendu, plus la charge a augmenté et la moyenne de puissance (MP) a été significativement plus élevée (1.6 %) avec une charge de 6.6% BW (Driss et al., 2001). Au niveau des études longitudinales : dans une revue effectuée par Macadam et al. (2016), ces derniers ont montré que la performance du saut peut être améliorée avec toutes les charges (7-30%) pour toutes les durations des études revues (3-10 semaines) et pour différents profils d'athlètes (étudiants en sport à coureurs de vitesse de niveau national). Des augmentations significatives ont été trouvées pour le SJ (9.5-19.4%), CMJ (7.8-12%), *drop jump* (6.5-12.8%), lors d'un exercice de 15 secondes de sauts répétés et pour le saut vertical (9.4%). Finalement, trois études ont évalué

les effets sur la cinétique des sauts. Deux études montrent un déplacement de la courbe F-V sur la droite pour des charges entre 7-11% BW. Dans un même temps, la puissance dégagée lors d'un exercice de 15 s de sauts répétés a augmenté ainsi que la puissance lors d'un *drop jump* ; une charge de 30% BW a été utilisée dans un protocole de 8 semaines avec des étudiants en sport : en fin de protocole, la puissance avait augmenté significativement sur le SJ (11%) et aussi significativement sur le CMJ (3%).

1.4 L'hypoxie

L'entraînement en hypoxie fait partie de la préparation des athlètes d'élite d'aujourd'hui. L'état d'hypoxie est défini comme la réduction de la pression barométrique (PB) et/ou la réduction de la fraction inspirée d'O₂ (F_iO₂) à des niveaux de pression partielle inspirée d'O₂ (P_iO₂) inférieurs à 150 mmHg (Millet et al., 2012). Le type d'exposition à l'hypoxie est ainsi de deux natures :

- Hypoxie hypobarique (HH ; F_iO₂ = 20.9 % ; PB < 760 mmHg), soit diminution de la PB à travers la montée en altitude ou d'utilisation de chambre hypobarique ;
- Hypoxie normobarique (NH ; F_iO₂ < 20 % ; PB = 760 mmHg), soit diminution de la F_iO₂ pour des systèmes artificiels (Millet et al., 2012).

Différents champs d'investigation ont mis en évidence que HH déclenche des réponses physiologiques différentes que NH, et suggèrent que HH représente une condition environnementale plus sévère que NH (Millet et al., 2012).

Traditionnellement, la montée en altitude a été associée à des performances d'endurance moindres (Hamlin et al., 2015). Par contre, l'exposition chronique à l'altitude modifie les systèmes de fonctionnement du corps, en ce qui concerne la fourniture d'énergie aérobie qui semble être bénéfique pour des adaptations chroniques d'augmentation de la performance (McLean et al., 2013). Au contraire, les activités physiques non aérobies, c'est-à-dire, des activités courtes (moins d'une minute) semblent offrir des effets immédiats quand réalisées en altitude (Levine, 2008). L'hypoxie apparaît pour créer des réponses positives dans le développement de la performance musculaire avec l'hypertrophie musculaire et des gains en force et vitesse dans les mouvements explosifs (Feriche et al., 2017). Cependant, le fait que l'entraînement de la résistance soit important pour la performance, la réponse musculaire sous condition d'hypoxie n'a pas été encore étudiée en détail (Feriche et al., 2017). Peu d'études ont évalué l'effet de l'hypoxie dans les métabolismes aérobie et anaérobie, ou dans la capacité à récupérer selon la densité de l'exercice au cours de l'entraînement de résistance. Dans

l'entraînement de la résistance, la combinaison de la charge, les séries, le nombre de séries, le temps de récupération et la vitesse du mouvement, sont des facteurs clés dans la compréhension des changements musculaires physiques et fonctionnels dérivés de l'entraînement spécifique de résistance. De nos jours, la science a pu décrire la combinaison à utiliser pour l'hypertrophie musculaire et l'augmentation de la force, ainsi que pour augmenter la puissance. Pour l'hypertrophie et l'augmentation de la force, la méthodologie traditionnelle conseille 6-12 séries de 8-12 répétitions avec une vitesse de déplacement basse, d'une charge de 65-80% 1RM et 1-3 minutes entre séries (Kraemer et Ratamess, 2004). Pour l'augmentation de la puissance musculaire sont conseillées 4-6 séries de 4-6 répétitions d'une charge de 0-50% 1RM, des exercices balistiques avec un temps de récupération de 3-5 minutes (Cornie, P. 2011). Il serait important alors de savoir quelles seraient les réponses musculaires et fonctionnelles à l'entraînement de résistance avec différents stress hypoxiques. En ce qui concerne l'entraînement en hypoxie, différentes méthodes peuvent être utilisées. La HH produit son effet de diminution de la disponibilité d'O₂ dans les tissus par la montée en altitude ou en utilisant la chambre hypobarique. La réduction de la pression barométrique réduit aussi la résistance de l'air au mouvement comme le résultat de la diminution de la densité de l'air. La réduction de la température et de l'humidité est aussi attendue. La NH agit sur la réduction de la pression d'O₂ dans l'air inspiré à travers la dilution de nitrogène ou de la filtration d'O₂ (Feriche et al, 2017). Depuis des années, différentes stratégies d'entraînement et de récupération ont été mises en place soit en utilisant les méthodes d'hypoxie naturelle, soit en utilisant les méthodes artificielles : vivre en altitude et entraîner en altitude (LHTH) ; vivre en altitude et entraîner en altitude et en plaine (LHTHL) ; vivre en altitude et entraîner en plaine (LHTL), vivre en plaine et entraîner en altitude (LLTH) ; ou encore, vivre en altitude et entraîner en plaine et en altitude (LHTLH) (Girard et al., 2017). Selon cette dernière actualisation conceptuelle, l'entraînement de résistance en hypoxie (RTH) appartient à la famille LLTH (Girard et al, 2017). L'entraînement de résistance en hypoxie, et notamment la recherche scientifique produite sur le sujet, est confiné à l'exposition intermittente artificielle d'hypoxie en exercice avec le repos en normoxie (LLTH) (Scott et al. 2015). Comme constaté lors des explications décrites ci-dessus, les méthodes d'entraînement en hypoxie ont eu un développement croissant. Ci-dessous la figure représentant l'état actuel de l'art.

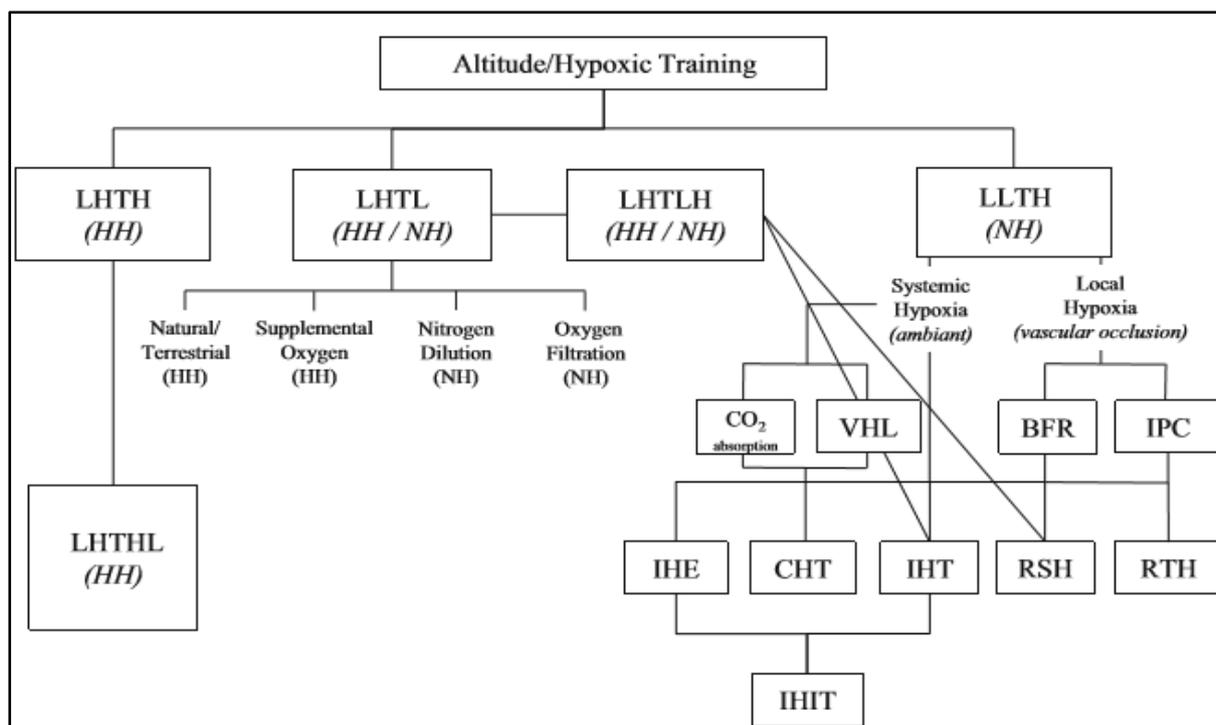


Figure 2. L'état de l'art sur les combinaisons possibles d'entraînement en hypoxie. Figure tirée de Girard et al. (2017).

1.4.1 La RTH (Resistance training on hypoxia)

L'exercice en hypoxie systémique est une méthode alternative d'entraînement où la quantité d'oxygène disponible pour respirer est réduit dans l'environnement, soit de façon naturelle, soit de façon simulée. Cette technique a montré des améliorations dans la performance aérobie et anaérobie (Bonetti et al., 2006), dans la puissance (Hamlin et al., 2010) et aussi au niveau de la force musculaire (Manimmanakorn et al., 2013 ; Nishimura et al., 2010). Dans le cas de l'entraînement de la force, la RTH a été indiquée comme importante pour l'augmentation de la force, puissance et vitesse entre les athlètes (McGuigan et al., 2012). Comme la figure ci-dessus le montre, l'entraînement de contre-résistance en hypoxie (*resistance training in hypoxia* ou RTH) peut être réussi en utilisant l'hypoxie locale (à travers l'utilisation d'un pré-conditionnement ischémique) ou l'hypoxie systémique (à travers l'installation d'une ambiance d'hypoxie). Cette dernière, que nous désignerons par défaut RTH, nous intéresse tout particulièrement dans le cadre de ce travail.

En revanche, pendant la dernière décennie, l'entraînement en occlusion (*blood flow restriction* ou BFR) a suscité beaucoup d'intérêt pour l'entraînement de résistance. Cette technique consiste en la création d'une hypoxie locale pendant l'exercice (Loenneke et al., 2009) et a été la première technique utilisée pour ce genre d'entraînement en hypoxie (Takarada et al., 2000).

Grâce à cette technique, des nombreux résultats ont démontré une augmentation significative de la force et de l'hypertrophie (Takarada, et al., 2002 ; Abe et al., 2005 ; Sumide et al., 2009) après un entraînement de 2 à 16 semaines à une charge de 20% 1RM. Nous pouvons ainsi croire que les réponses à l'entraînement de RTH peuvent être aussi positives comme celles de la BFR (Manimmanakorn et al., 2013).

Le fait que la RTH est très récente et que peu de travaux existent sur le sujet, les résultats se montrent diffus et parfois contradictoires, car issus de différentes méthodologies utilisées dans les recherches (Scott et al., 2014). Plus en détail, l'entraînement de résistance en conditions hypoxiques a reporté des améliorations significatives de l'hypertrophie et aussi de la force pour les petites charges (20% 1RM) (Manimmanakorn et al., 2013) ainsi que pour les charges modérées (70% 1RM) (Nishimura et al., 2010). Manimmanakorn et al. (2013) a combiné des charges petites avec un stress hypoxique modéré ($PSA = 80\%$) et des intervalles de repos très courts (30 s), tandis que Friedman et al. (2003) a utilisé aussi des petites charges (30% 1RM) combinées avec un stress hypoxique plus grand ($F_iO_2 = 12\%$) et des intervalles de repos aussi plus grands (60 s), mais n'a observé aucune amélioration significative par rapport au groupe contrôle. Scott et al. (2014) met en évidence que, par rapport à la RTH en utilisant des charges petites, les intervalles de repos entre les séries et le degré d'hypoxie ont des effets sur les réponses adaptatives. Nishimura et al. (2010) a démontré des améliorations d'hypertrophie et force entre l'entraînement en RTH et les sujets de contrôle, en combinant des charges modérées (70% 1RM) avec un niveau d'hypoxie également modéré ($F_iO_2 = 16\%$) et un temps de récupération entre séries bref (60 s). En revanche, Ho et al. (2014) et Kon et al. (2014), en utilisant des charges similaires (70% 1RM ou 10RM) ainsi qu'un niveau d'hypoxie similaire ($F_iO_2 = 14,4-15\%$), mais avec des périodes de répétition plus longues entre les séries (60 s), n'ont trouvé aucune amélioration entre le groupe RTH et le groupe contrôle. De plus, une autre étude a montré une augmentation significative de l'hypertrophie, mais pas d'adaptations de force après la RTH, par rapport à un groupe de contrôle, en utilisant une charge modérée (10RM) et des récupérations assez brèves (60 s) avec un stress hypoxique élevé ($F_iO_2 = 12,7\%$) (Kurobe et al., 2014). Plus récemment, Inness et al. (2016) ont montré que, à l'issue d'une période d'entraînement de 7 semaines avec des charges modérées à maximales croissantes (75-105% 1RM), avec un niveau hypoxique modéré ($F_iO_2 = 14\%$) et un temps de repos élevé (3 min), il est plus efficace pour l'augmentation absolue et relative de la force que le même entraînement du groupe de contrôle. Nous constatons que, parmi toutes ces études, les variables, les temps d'intervention, les charges d'entraînement, le stress hypoxique utilisé et le temps de

repos entre séries, changent beaucoup entre les études, ce qui rend difficile la possibilité d'établir une tendance. Par rapport à l'efficacité des études, les différentes méthodologies utilisées peuvent être la cause des résultats contrastants (Scott et al., 2014). D'autant plus que certaines méthodologies utilisées ne sont pas censées, en accord avec la connaissance d'aujourd'hui, produire des altérations positives. Par exemple, dans l'étude de Friedman et al. (2003) a été conçu un programme de 4 semaines qui peut se révéler insuffisant pour la stimulation de l'hypertrophie. Cependant, l'ensemble des données revues suggèrent que l'utilisation de la RTH peut être bénéfique pour la stimulation de l'hypertrophie, confirmant ce qui a été observé pour la technique BFR. De plus, étant donné que l'utilisation de la technique BFR augmente les réponses adaptatives aiguës et chroniques, il se peut que les mêmes bénéfices soient attendus en utilisant l'hypoxie systémique (Manimmanakorn et al., 2013). Les derniers travaux ont suggéré que les adaptations musculaires subies, soit par la BFR, soit par la RTH/entraînement contre-résistance en hypoxie intermittente (*interval hypoxia resistance training* ou IHRT), sont liées au niveau d'oxygénation musculaire et au degré de stress métabolique associé à l'exercice (Scott et al., 2014). L'utilisation de l'hypoxie systémique pour l'entraînement de résistance (NH, réussi par dilution de nitrogène, d'extraction d'O₂ ou l'utilisation d'un masque) peut être considérée comme une alternative valable au BFR tout en évitant la restriction de l'entraînement à des locaux spécifiques, la douleur, les hémorragies et les vertiges provoqués par l'usage des garrots (Scott et al., 2014).

1.4.2 Explication physiologique

La diminution de la performance de l'endurance en altitude est une réalité avec des pertes en moyenne de 6% de la $\dot{V}O_2\text{max}$ pour chaque 1 000 mètres montés (Wehrlin et Halle, 2006). Par contre, des efforts courts, moins d'1 minute et d'intensité élevée, utilisent davantage l'ATP, venu de la phosphorylation et des processus non-oxydatifs (di Prampero, 2003). Étant donné que les performances explosives ne sont pas dépendantes de la voie aérobie, l'altitude n'impacte pas celles-ci. En effet, cela a été confirmé pendant les Jeux Olympiques de Mexico, en 1968, dans les courses de sprint (Péronnet et al., 1991). Péronnet et al. (1991) ont proposé que la densité de l'air diminue avec l'altitude (réduction de 3% pour chaque hausse de 305 m) ce qui entraîne à une diminution du coût énergétique de la course à des vitesses élevées. Cette diminution énergétique peut être liée à la diminution de la résistance externe au mouvement (Hahn et Gore, 2001) et/ou au changement du profil de recrutement musculaire dû à

l'augmentation du métabolisme anaérobie (Billaut et al., 2012), ce qui peut être à l'origine des améliorations des actions rapides, tels que les sauts, les lancements et les sprints (Levine et al., 2008 ; Hamlin et al., 2015 cité par Feriche et al. 2017 ; Hahn et Gore, 2001). D'une façon plus succincte, différentes hypothèses ont été avancées pour essayer d'expliquer ces résultats : a) la réduction du coût énergétique pour performer des actions isolées à des vitesses élevées (Perronnet et al., 1991) ; b) la réduction de la résistance aérodynamique en proportion approximative au carré de la vitesse (Hamlin et al., 2015 cité par Feriche et al., 2017 ; Levine et al., 2008 ; Hahn et Gore, 2001) ; c) la modification du recrutement des unités motrices à cause de l'augmentation de l'utilisation du métabolisme anaérobie (Billaut et al., 2012).

De plus, Feriche et al (2017) avance que si ces adaptations ont lieu en actions isolées, les bénéfiques peuvent être obtenus pendant une période prolongée d'entraînement d'explosivité spécifique en altitude peut ouvrir des nouvelles lignes d'investigation et des nouveaux protocoles d'entraînement.

Diverses études ont été produites dernièrement pour essayer de comprendre les mécanismes derrière ces adaptations. Des modifications biomécaniques et neuromusculaires associées à la production de force peuvent avoir une influence sur des altérations de la performance après un stage en altitude (Chapman et al., 2014). En accord avec cela, Feriche et al. (2017), soulignent que l'augmentation de la vitesse d'un mouvement peut être attribuée à l'amélioration de la fréquence de décharge des motoneurones et des reflex spinaux. D'ailleurs, une autre étude conclut que l'exposition aiguë à l'altitude simulée est liée à l'augmentation de l'excitabilité spinale (Delliaux et Jammes, 2006). Également, l'hypoxie semble avoir un effet sur les structures supra-spinales. En effet, l'amplitude du reflex H du muscle soléaire est augmentée en altitude réel (2 320 m) par rapport au niveau de la mer (Tomazin et al., 2016 cité par Feriche et al., 2017). En outre, respirer un mélange de gaz hypoxique pendant un entraînement semble augmenter la taille des fibres rapides par rapport à un entraînement en situation normoxique (Melissa et al., 1997, cité par Feriche et al., 2017), ce qui peut être lié à un plus grand recrutement des fibres rapides (Feriche et al., 2017). Enfin, il y a encore un long chemin à parcourir dans l'étude de l'impact de l'hypoxie dans la performance musculaire et dans la biomécanique des mouvements spécifiques du sport pour connaître en profondeur ses enjeux (Feriche et al., 2017).

L'image ci-dessous montre en résumé les mécanismes physiologiques à propos de l'exposition à l'altitude lors de la pratique des mouvements explosives.

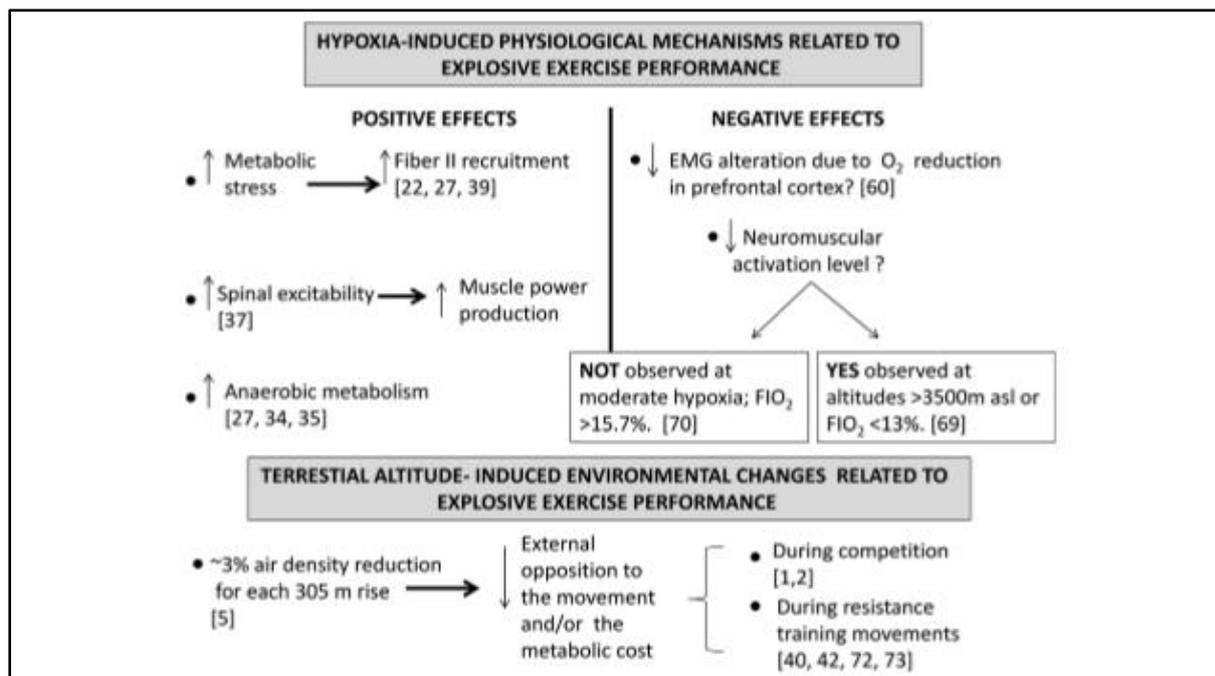


Figure 3. Mécanismes physiologiques induits par l'hypoxie lors des mouvements explosifs. Figure tirée de Feriche et al. (2017).

1.4.3 L'hypoxie aiguë

Quand un individu est soumis à des conditions d'altitude, soit réelle soit simulée, des mécanismes physiologiques se mettent en route pour essayer de garantir l'homéostasie du corps. Les réponses qui sont apparues immédiatement ou très rapidement (dans les premières heures à quelques jours), après la montée en altitude, sont les adaptations aiguës. D'autres sont apparues plus tard (des effets visibles d'une à deux semaines) et de façon progressive, sont des adaptations chroniques (Girard et al., 2013). Dans le cadre de ce mémoire, nous nous concentrerons sur les adaptations aiguës. En adaptation aiguë, la diminution de P_iO_2 entraîne une diminution de la pression alvéolaire en O_2 , et celle-ci va résulter en une réduction de la diffusion alvéolo-capillaire et, par effet de cascade, en une diminution de la pression artérielle en O_2 . En conséquence, une augmentation de la ventilation et une diminution de la saturation en O_2 (S_aO_2) sont constatées (Edwards et Polman, 2013). À l'effort, cette hyperventilation est encore plus intense due au travail des muscles ventilatoires pour supprimer les besoins d' O_2 référents à l'exercice, ce qui va provoquer une fatigue inhabituelle de ceux-ci. Une compétition entre muscles respiratoires et locomoteurs se met en place pour l' O_2 (Amann et al., 2007). D'ailleurs, cette compétition entre ces deux types de muscle est considérée comme une des causes de la baisse de performance aérobie en altitude (Amann et al., 2017). Amann et al. (2007) souligne que la baisse de S_aO_2 n'est pas en soi un signe de limitation de la performance. Ceci est valable pour des niveaux d'hypoxie équivalents à 4000-5000 mètres d'altitude, car en

dessous de ces altitudes, la fatigue est surtout périphérique. Seulement, au-dessus de ce seuil, elle devient centrale avec un préjudice sur la perception d'effort.

S'il n'y a pas beaucoup de littérature sur la performance en hypoxie en général, les travaux scientifiques en relation à l'exposition d'hypoxie aiguë sont encore plus rares et tout aussi controversés. Récemment, une étude n'a pas pu montrer des effets sur les mesures de force et puissance résultant de l'exposition aiguë à l'hypoxie simulée, modérée et sévère (fraction d' O_2 inspiré $[F_iO_2]$ de 16% et 13%), pendant un entraînement à haute intensité de *squat* et de soulevé de terre (Scott et al., 2014). En revanche, des améliorations de la courbe F-V du *half back squat* ont été montrées après la montée rapide à une altitude terrestre de 2 320m. Des augmentations de 4% en vitesse, 7% en puissance et de la charge à laquelle la plus grande puissance a été enregistrée ont été produites ($p < 0.05$) (Chirosa et al., 2006). Dans le même sens, l'exposition aiguë des nageurs à une altitude modérée a montré une amélioration, même si celle-ci est peu significative, sur le temps des premiers 15 mètres d'un 50 mètres *crawl* (Mercadé et al., 2013 cité par Feriche et al., 2014). Également dans la natation, des améliorations sur la technique (i.e., l'augmentation de 2.4 % de la fréquence de cycle) induites par l'exposition aiguë modérée à l'altitude réelle ont été observées (Mercadé et al., 2006). Une autre étude a voulu comparer l'exposition aiguë à l'hypoxie en HH et en NH. Les résultats ont montré des gains sur la 1RM, sur la vitesse de mouvement et de la puissance pendant la courbe Force-vitesse de l'exercice de développé couché en HH, quand comparé à NH (Feriche et al., 2014). Dans la même mesure, une autre étude a comparé l'effet de l'exposition aiguë à l'altitude terrestre (2 320) sur la courbe F-V du SJ. Les résultats montrent une augmentation de la V_0 et de la P_{max} en altitude par rapport au niveau de la mer (Garcia-Ramos et al., 2014). Dans une autre étude, Garcia-Ramos et al. (2016) montrent que les valeurs maximales de force (F_{peak}), puissance (P_{peak}) et vitesse de décollage (V_{peak}) ont été plus grandes pour un CMJ et la V_0 et P_0 ont été supérieurs pour un SJ lors de l'exposition aiguë à l'altitude terrestre. Également, pour le SJ, une autre étude a montré que la valeur la plus élevée de vitesse (V_{peak}) est plus grande dans tous les pourcentages du poids du corps de la relation F-V après l'exposition aiguë à HH (Garcia-Ramos et al, 2017). Dans cette même étude fut évaluée l'évolution de la relation F-V en altitude face aux résultats en normoxie pris au préalable. Les résultats ont montré une augmentation plus importante en aiguë qu'en chronique, 6.5% et 4.5% respectivement, pour une exposition à altitude réelle modérée. Enfin, une étude a voulu évaluer si l'hypoxie simulée aiguë influençait la capacité à produire de la puissance. Le même groupe des sujets ont performé des sauts pendant 15 secondes en condition de normoxie, d'hypoxie modérée (MH ; F_iO_2 16,5%) et d'hypoxie haute

(HH ; FiO₂ 13,5%). Des différences significatives ont été trouvées entre HH et N pour la moyenne des puissances (MP) et pour la perception d'effort ; ainsi, la puissance lors des sauts n'est pas négativement affectée par hypoxie modérée ou sévère en comparaison avec la condition de normoxie avec une hypoxémie et une perception d'effort plus prononcée (Alvarez-Hermes et al., 2015). Le tableau ci-dessous met en évidence de manière résumée les principaux résultats des études revues qui mesurent les effets de l'exposition aiguë à l'altitude pendant des actions explosives.

Tableau 1. Revue de la littérature sur l'hypoxie à l'exposition aiguë. Tableau adapté de Feriche et al. (2017)

| | n/ procédure | Niveau sportif | Condition/ niveau d'hypoxie | Intervention | | Effets d'hyp. (P<0,05) |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|--|---|---------------------------|---|
| | | | | Méthodologie | Exercice | |
| Chirosa et al (2006) | 5/ randomisé N et HH | Etudiants en sport | HH/ 2320 m | Courbe F-V 10 séries x 10 rep. | Squat | P _{max} . Charge (P _{max}) |
| Scott et al (2015) | 12/ randomisé N et NH | Entraînés en résistance | NH et Masque faciale/ 16% FiO ₂ et 13% FiO ₂ | 80% 1RM 5 séries x 5rep. 3 min de repos | Squat Soulevé de terre | P>0,05 |
| Feriche et al (2014) | 28/ N, NH et HH | Athlètes Judo, Karaté | HH/ 2320 m ; NH et Masque facial/ 16% FiO ₂ | Courbe F-V | Développé couché | 1RM V P |
| Garcia-Ramos et al (2014) | 18/ randomisé N et HH | Nageurs d'élite | HH/ 2320 | Courbe F-V | SJ | P _{peak} V _{peak} |
| Alvarez-Hermes et al (2015) | 8 | Sujets actifs | NH/ 16,5% FiO ₂ et 13,5% FiO ₂ | Bosco Explosif Jump Test | 15'' saut | MP RPE |
| Garcia-Ramos et al (2016) | 17/ randomisé N et HH | Nageurs d'élite | HH/ 2320 | Courbe F-V | SJ et CMJ | P ₀ , V ₀ V _{peak} , F _{peak} P _{peak} |
| Garcia-Ramos et al (2017) | 16/ randomisé N et HH | Nageurs d'élite | HH/ 2320 | Courbe F-V | SJ | V _{peak} |

1.4.4 Puissance musculaire et hypoxie

En ce qui concerne l'influence de l'hypoxie sur des exercices demandant de la puissance musculaire, les études ne sont pas suffisantes pour éclaircir complètement la problématique. La détérioration musculaire due à la haute altitude influence négativement la puissance musculaire (Ferretti et al., 1990). En opposition à des altitudes modérées, les changements observés sur la puissance musculaire et la vitesse sur des exercices isolés de résistance (*back squat*, *squat jump* et développé couché), dans les premières heures après la montée en altitude réelle (Feriche et al., 2014 ; Garcia-Ramos et al., 2016), semblent indiquer qu'une relation entre HH et la fonction musculaire doit exister (Feriche et al., 2017). Garcia-Ramos (2016) a étudié la réponse du muscle extenseur de la jambe en utilisant la méthode de la courbe F-V pour le SJ et CMJ après l'arrivée en altitude réelle. De façon à éviter le biais de l'utilisation de l'appareil attaché à la barre, et notamment à son interprétation, car il n'est pas possible de conclure si les athlètes appliquent plus de force en altitude ou si les résultats sont dus à la moindre résistance au mouvement, les mêmes paramètres ont été mesurés à travers d'une plateforme de force. Les résultats montrent des valeurs plus grandes de la P_0 et de la V_0 en altitude (HH) par rapport à la normoxie. En complément, les valeurs de la force exercée sur la plateforme lors des sauts sans charge sont aussi améliorées face à la normoxie ainsi que la hauteur des sauts (+3.4%). L'ensemble des résultats mettent en évidence l'influence que l'aérodynamique peut avoir sur la vitesse et montre encore un effet très clair de l'altitude sur la relation F-V. Ceci soutient l'hypothèse que la relation entre l'hypoxie hypobare et la fonction musculaire doit, à un certain point, converger en un bénéfice supplémentaire produit par la résistance aérodynamique inférieure existante en HH, sur les mouvements explosifs isolés. (Feriche et al., 2017).

La réduction de la commande centrale et, par conséquent, la diminution de la puissance dégagée est attribuée à l'accumulation des métabolites due à la baisse d' O_2 (Amann et al., 2006). De plus, une influence entre la fraction de O_2 inspiré (F_iO_2) et le système nerveux central a été mise en évidence (Millet et al., 2009). Dans cette étude, des conditions de BFR et NH ont été testées pendant un exercice intermittent d'extension unilatérale du genou jusqu'à la fatigue. Le nombre des répétitions fut affecté dans les deux conditions, mais un peu plus en NH. La conception utilisée dans cette étude a conduit à conclure que l'hypoxie systémique a une influence directe sur la commande centrale, indépendamment des facteurs développés dans les muscles (Feriche et al., 2017). Subudhi et al. (2007) avaient aussi reporté que l'exercice en hypoxie systémique peut induire changements au niveau de l'oxygénation cérébral.

L'oxygénation cérébrale altérée due à l'hypoxie sévère peut jouer donc un rôle régulateur pendant la RTH/ IHRT (Scott et al, 2014).

Une autre étude met en évidence les différences que la pression barométrique peut amener à la performance des mouvements explosifs, soit isolés, soit répétés. D'une population de 28 athlètes de sport de combat ont été créés deux groupes. Les courbes F-V dans le développé couché ont été comparées entre Normoxie (N), altitude modérée terrestre (HH, 2 320m) et normobarique hypoxie (NH, 15.7% F_iO_2). Les résultats montrent un effet très important dans les courbes F-V en HH aiguë, quand comparées avec les résultats obtenus en N et NH. En effet, en HH aiguë, une augmentation moyenne de 3.2% de la charge liée à la puissance maximale moyenne, ainsi que des améliorations claires de la puissance moyenne, de la puissance maximale et de la vitesse maximale pour la même charge absolue (Feriche et al., 2014) ont été observées. De plus, une augmentation de 6% de la 1RM en HH a été observée. Une autre étude met encore en évidence ce manque d'effet sur la puissance en NH. Il a été mené sur 12 athlètes de résistance qui ont été randomisés en trois conditions, normoxie, hypoxie modérée (MH, 16% F_iO_2) et hypoxie élevée (HH, 13% F_iO_2) à l'aide d'une unité portable d'hypoxie. Les tendances de puissance et de force sur 5 séries de 5 répétitions à 80% de la 1RM pour une NH aiguë modérée et élevée n'ont pas varié en fonction des tendances enregistrées dans la condition de normoxie (Scott et al., 2015). En conclusion, les études menées jusqu'à aujourd'hui montrent un effet positif sur la vitesse, sur la puissance et la force dynamique maximale ; ensuite, les exercices de résistance de base montrent des avantages en situation de HH qui nous ne retrouvons pas en situation N ou NH (Feriche et al., 2017).

Une relation a bien été établie entre stress métabolique induit par l'augmentation d'hydrogène (H^+), à cause de la diminution de la saturation en O_2 (S_aO_2) et le recrutement des fibres musculaires rapides (Schoenfeld, 2013). Des anomalies de l'activité électromyographique ont été observées en conditions d'hypoxie aiguë (13% F_iO_2) (Amann et al., 2007), mais ce n'est pas le cas des altitudes modérées (Harris et al., 2013). De plus, l'activité électromyographique a été observée de façon égale entre NH et normoxie pendant des exercices de contraction maximale et de puissance (Manimmanakom, A. et al., 2013). En ce qui concerne les actions courtes et explosives (~5 s plus 3-5 min de repos) qui sont représentées par les courbes F-V, les bénéfices de l'hypoxie normobarique ne sont pas observés, que ce soit en hypoxie modérée (16% F_iO_2) ou en sévère (13% F_iO_2) (Feriche et al., 2014 ; Scott et al., 2015). Par contre, des bénéfices ont été trouvés en altitude terrestre (Feriche et al., 2014). L'ensemble de ces résultats expose l'idée que respirer de l'air pauvre en O_2 est uniquement responsable dans le remplacement des fibres

type I par des fibres type II (Manimmanakom et al., 2013), ce qui rend le mouvement plus rapide dû à la capacité intrinsèque que les neuromoteurs plus larges ont de dégénérer des impulsions à des vitesses plus grandes (Feriche et al., 2017). Il paraît probable que les différences entre les résultats obtenus entre HH et NH soient contrôlées par d'autres facteurs et/ou d'autres interactions qui n'ont pas encore été étudiées (Feriche et al., 2017). De même, Millet et al. (2012) montrent qu'en situation d'exposition chronique existe un bénéfice additionnel de la HH par rapport à NH – des améliorations de puissance moyenne de 4.1% en HH contre 1% en NH ont été vérifiées – tout en rappelant que les principaux mécanismes continuent pour expliquer. En somme, même si aujourd'hui les effets de l'hypoxie sont beaucoup plus clairs, les chercheurs mettent l'accent sur la nécessité de continuer les recherches sur ce domaine pour essayer de comprendre les mécanismes qui les régulent.

1.5 Intérêt de l'étude et hypothèses

D'une façon générale, cette recherche a l'intention d'analyser les effets de l'hypoxie aiguë et vise rajouter quelque chose de plus à ce qui avait déjà été fait auparavant. Elle ne vise pas à fournir des conclusions ni sur les méthodes d'entraînement ni sur les consignes sur la dose hypoxie à accorder pour un objectif déterminé. **Elle vise plutôt à donner quelques indications par rapport aux paramètres à utiliser en RTH.**

Afin d'atteindre cet objectif, cette étude se divise en deux parties, celle qui analyse l'effet de l'hypoxie aiguë à travers des sauts isolés et celle qui analyse l'effet de l'hypoxie aiguë à travers des sauts répétés. C'est ici qui surgit la partie innovante de cette étude, celle de l'utilisation du saut CMJ. Bien que ce saut ait souvent été utilisé dans les travaux scientifiques afin de mesurer les paramètres biomécaniques, morphologiques ou physiologiques il n'a pas été trop utilisé dans la recherche en RTH (seulement en un travail) et jamais dans un protocole de sauts répétés.

Les caractéristiques fonctionnelles de ce saut, permettent une représentation plus réelle des caractéristiques des sauts existants dans la majorité des pratiqués par la population de cette étude, ce qui permet un transfert de données plus proches de la réalité de la population étudiée. Dans la même logique, l'utilisation des WR permet aussi de maintenir les spécificités de l'entraînement car l'utilisation de ces gilets permet d'augmenter le stress métabolique de l'entraînement sans mettre en cause la qualité du mouvement désiré. A notre connaissance, aucun autre protocole, jusqu'à aujourd'hui, n'a mis ensemble le travail de résistance explosif continu (sur un minute) avec l'utilisation de la WR en environnement hypoxique.

Ainsi à travers de la méthodologie de la courbe F-V il sera possible de vérifier, dans cette étude, si l'hypoxie normobarique aiguë a des effets sur les valeurs d'un CMJ sur une population pratiquant des sports collectifs. Deuxièmement, il sera également possible d'analyser la fatigabilité en conditions d'hypoxie normobarique sur des sauts répétés.

D'une façon succincte les hypothèses de recherche de cette étude sont formulées de la façon suivante :

- a) Les valeurs de F, V et P ne changent pas de façon significative entre les 3 conditions d'hypoxie étudiées.

En effet, comme a constaté Feriche et al (2014), il est attendu que les effets sur la F, la V et la P ne soient pas observés lorsque les mouvements explosifs sont réalisés en hypoxie normobarique.

- b) Les puissances moyennes (MP) atteintes seront moindres en altitude simulée sévère (SH) qu'en altitude simulée modérée (MH) et encore plus petites au niveau de la mer (N).

Dans ce cas, il est attendu que la performance globale de l'exercice soit davantage péjorée dans un environnement pauvre en O₂. Ceci est dû à l'importance de la présence du O₂ soit au niveau périphérique pour la maintenance de l'efficacité du ECC (Amann et Calbet, 2008) soit au niveau central pour la régulation de la commande qui impacte l'intensité d'un effort (Amann et Dempsey, 2008).

- c) L'indice de fatigue sera significativement plus grand en SH qu'en MH ou qu'en N.

En découlant de l'hypothèse antérieure, il est attendu que les séries réalisées en SH aient un indice de fatigue plus élevé qu'en MH ou N, car la réduction de la commande centrale et, par conséquence, la diminution de la puissance dégagée sont attribuées à l'accumulation des métabolites due à la baisse d'O₂ (Amann et al., 2006).

2. Méthodes

2.1 Sujets

Seize sujets masculins (âge : 25.3 ± 6.6 années ; taille : 1.84 ± 0.08 m ; masse : 77.8 ± 7.1 kg) en bonne santé et sportifs amateurs de sports collectifs, dont 5 pour le volleyball, 5 pour le basketball et 6 pour le football, ont participé volontairement à cette étude. La pratique hebdomadaire de leur sport varie entre 3 à 5 fois par semaine en période de compétition. Tous les participants habitent et développent leur activité à moins de 1 000 mètres d'altitude et personne n'a été exposé à un séjour prolongé en altitude au cours des 30 jours précédant l'étude. Les sujets ont déclaré ne pas avoir réalisé d'entraînements de force et/ou de puissance 15 jours avant et pendant la durée du protocole. Tous les sujets ont commencé et complété le protocole destiné. Un sujet a abandonné l'étude après la première séance à cause d'une blessure contractée précédemment ; ses données n'ont donc pas été prises en considération.

Avant le début du protocole, tous les sujets ont reçu l'information de son déroulement par le biais d'une notice (annexe 7.1). Ils ont signé un consentement de participation (annexe 7.2) en ayant pris connaissance du protocole. Les sujets ont reçu à la fin de leur participation un rapport avec les résultats de leurs tests, notamment la relation F-V du CMJ et de la moyenne de puissance (MP) et puissance maximale (PP), et des tests de CMJ répétés. Les sujets n'ont reçu aucune rétribution financière pour leur participation.

Cette étude a été autorisée par la CER-VD (Ethical Commission for Human Research 138/15)

2.1.1 Critère d'inclusion

Le critère d'inclusion dans cette étude était d'être des hommes pratiquant des sports collectifs de niveau amateur. La taille minimale de l'échantillon a été calculée a priori comme $n = 12$.

2.1.2 Critère d'exclusion

La pratique de l'haltérophilie ou d'un entraînement de musculation a été un critère d'exclusion. Les porteurs de blessures chroniques au niveau du dos, épaules et genoux n'ont pas été acceptés, compte tenu du type de tests.

2.1.3 Recrutement des sujets

Le recrutement a été fait par des affiches de recrutement (annexe 7.3) et des visites aux centres d'entraînements des équipes. Après une brève présentation du projet au responsable (annexe 7.4), généralement l'entraîneur, celui-ci a informé les joueurs du projet. Les joueurs intéressés sont entrés en contact, et le maintien de ce contact s'est fait par courrier électronique.

2.2 Le matériel

Le matériel listé ci-dessous a été utilisé pendant le protocole expérimental :

- Balance : Beurer BF 800, Beurer GmbH, Ulm, Allemagne ;
- Ergocycle : eBikeasic GE Healthcare Freiburg, Allemagne ;
- Oxymètre de pouls : Pulsoximeter, PO-400, Novidion GmbH, Qinhuangdao/ Hebei, Chine ;
- Lactate : Lactate Scout+, EFK-diagnostic GmbH, Barleben/ Magdeburg, Saxe-Anhalt, Allemagne ;
- Bandelettes pour mesurer le lactate : Lactate Scout Sensors, SensLab, Allemagne ;
- Myotest : Myotest SA, Sion, Suisse ;
- Logiciel Myotest : Myotest Pro Software version 1.3 ;
- Gilet lesté : Weighted vest-black 30 kg, Gorilla Sports, Stein am Rhein, Suisse ;
- RPE : Échelle de Borg [6-20] ;
- Barre de poids à 9 kg ;
- Barre en plastique très légère ;
- Poids de 0.5, 1, 2.5, 5, 10 et 20 kg ;
- Tape : Leukotape large Vibraye, France ;
- Feuilles de calcul : Logiciel Excel 2016 ;
- Logiciel de statistique : *Sigmastat* 3,5 et *Sigmaplot* 11.0.

2.2.1. Le Myotest

Le Myotest (MYO) (dimensions : 5.4 x 10.2 x 11.1 cm ; poids : 58 g) fut l'appareil choisi pour mesurer les données importantes à cette étude, telles que la force (F), vitesse (V) et puissance (P) pour les sauts isolés, et la puissance moyenne (MP) et la puissance maximale (PP) pour les sauts répétés. Le MYO est un accéléromètre à trois dimensions qui mesure l'accélération [m/s²]. Les signaux du MYO sont collectés à une fréquence de 500 Hz. L'appareil a la capacité de stocker des données pendant un ou plusieurs tests pour qu'elles soient ultérieurement déchargées dans le logiciel Myotest Pro (Casarteli, 2010). Le logiciel a à son tour la capacité de transférer les données dans des feuilles de calcul Excel. Le placement de l'appareil doit être perpendiculaire à la ceinture de velcro, en position verticale au-dessus de la hanche gauche et dans le sens du saut (Casarteli, 2010). La ceinture a été toujours bien serrée, de manière à ne pas bouger lors des sauts.

Le MYO détermine la hauteur du saut vertical à travers la mesure de la force, qui est le produit de l'accélération du saut et le poids du sujet (Nuzzo, 2011). En d'autres termes, le calcul de la force [Newton (N)] effectué pour le MYO est la somme du produit de la masse pour la gravité et le produit de la masse pour l'accélération : $F = mg + ma$. Pour ceci, la calibration du poids dans l'appareil doit toujours être faite avant chaque saut, afin que le poids inséré soit correct. La vitesse (cm/s) dérive de l'intégrale de l'accélération, et la puissance [Watt (W)] est le produit de la force pour la vitesse : $P = F \times V$. Le temps de vol, à l'origine du calcul de la hauteur de saut, est calculé par la différence des deux moments de temps, la fin de la phase concentrique du saut (quand la force vers le haut est égale à la force du poids) et l'atterrissage (quand la force d'atterrissage équivaut la force du poids) : $H = 9.81 \times 100 \times [t_{V_{\min} \text{ after peak}} - t_{V_{\max}}]^2 / 8$ (Mauch, 2014). De nombreux systèmes d'évaluation sont utilisés dans la recherche et sur le terrain pour le saut vertical. Quelques études ont été faites de façon à étudier la validation scientifique du MYO. Le MYO, basé sur le temps de vol, montre une excellente validité et fiabilité dans la mesure des sauts isolés ou répétés, quand comparés avec l'instrument Optojump (Casarteli, 2010). Dans une autre étude qui comparait le MYO et une plateforme de force, considérée comme le « *golden standard* » pour évaluer la force, les chercheurs ont conclu que le MYO reste fiable pour l'évaluation de la force, puissance et vitesse et hauteur de saut. De plus, ils ont légitimé le MYO comme un outil pour l'évaluation de la performance du saut (Mauch, 2014). Au regard de la légitimité scientifique de l'appareil, et en ajoutant la facilité d'utilisation, le MYO a été préféré pour l'accomplissement de ce projet.

2.2.2. Le gilet lesté

Les WR peuvent être sous la forme de veste (gilet lesté), shorts, manches pour les bras et les jambes, tout en laissant au porteur la possibilité de faire des mouvements spécifiques liés à son sport (Macadam et al., 2016). Le placement choisi pour charger les sujets dans ce protocole a été le tronc au travers d'un gilet lesté. Il a été montré que par rapport à la phase propulsive (phase étudiée dans ce travail), il n'y a pas d'effet sur le placement de la charge (tronc/ jambes) (Macadam et al., 2016). Il a été considéré que pour réaliser les sauts répétés avec une certaine charge, à l'occurrence 30% BW, l'utilisation d'une barre pouvait être dangereuse. Le gilet choisi (Weighted vest-black 30 kg, Gorilla Sports, Stein am Rhein, Suisse) pouvait être lesté à un maximum de 30 kg grâce à des petites charges uniformes. Le poids total était distribué par 20 unités de 1.5 kg chacune, 10 sur le front et 10 sur le dos, dont 6 sur le bas (hauteur de la taille) et 4 sur le haut (hauteur du pectoral). Des poches avec du velcro permettaient aux charges d'être complètement accrochées au gilet sans pouvoir bouger. Au moment d'enlever les charges pour accomplir les 30% BW de chaque sujet, une distribution équilibrée a été faite. Des arrondissements au 0.5 kg ont été faits pour tous les sujets au moment de préparer la charge. Le gilet avait encore deux singles, une au niveau pectoral et une autre au niveau de la taille, ce qui permettait un accrochage au corps efficace.

2.3 Protocole expérimental

La durée du protocole expérimental a été de 3 semaines pour chaque participant, dont une séance par semaine. Il y a eu trois cas où cette régularité n'a pas pu être maintenue en raison d'incompatibilités d'agenda des participants. Cependant, les horaires des séances ont été maintenus pour tous les sujets ainsi que la durée de la séance. Un intervalle de 72 heures entre deux séances a toujours été respecté. Pour la plupart des sujets, la récolte des données a été réalisée pendant le mois de mai 2017 (annexe 7.5). Deux sujets ont dû faire leur deuxième et troisième passage pendant le mois de juin.

Le protocole se compose de deux parties distinctes qui ont pour objectif de répondre à deux questions/hypothèses différentes (annexe 7.6). Ainsi, les tests ont été enchaînés au cours des mêmes séances. Les conditions d'hypoxie et la condition de normoxie étaient toujours aveugles pour les participants. En effet, le moniteur qui montre la fraction d'O₂ dans la chambre était toujours caché des participants. Toutes les séances ont eu lieu dans la chambre d'hypoxie au Centre Sport et Santé (CSS) de l'UNIL à Lausanne. Cette chambre fonctionne avec une

méthode de filtration d'O₂. Lumineuse, elle est d'environ 9 m² et est équipée d'un système d'air conditionné qui a permis de maintenir la température autour de 23 °C. Cet endroit se situe à 374 mètres d'altitude, ce qui est considéré comme le niveau de la mer (*sea level* ou sl) pour ce travail. Les trois conditions d'hypoxie sont les suivantes :

- a) Normoxie Normobarique (N) avec une F_iO₂ de 20,9% qui correspond au sl ;
- b) Hypoxie modérée (MH) avec une F_iO₂ de 16,9% qui correspond à une altitude simulée de 2 000 mètres ;
- c) Hypoxie sévère (SH) avec une F_iO₂ de 12,9% qui correspond à une altitude simulée de 3 800 mètres.

Le passage des sujets par les différentes conditions d'altitude a été randomisé afin d'éliminer l'effet de répétition des sauts. Ainsi ont été créés trois groupes (A, B, C) de sujets qui faisaient les passages selon un ordre précédemment planifié (annexe 7.7). Les sujets du groupe A ont performé l'ordre suivant : N, MH et SH ; ceux du groupe B : MH, SH et N ; et le groupe C a fait cet ordre : SH, N et MH.

2.3.1 Visite préliminaire

Une visite préliminaire a été réalisée pour tous les participants. Celle-ci a servi à se familiariser avec la chambre d'hypoxie, tandis que les mesures anthropométriques, tels que la taille et le poids (à l'aide d'une balance), furent prises. La mesure de la hauteur des yeux (regard droit en face du mur), quand le sujet atteint un angle de 90 degrés du genou, a été également prise en même temps. Une marque a été collée contre le mur avec l'inscription du nom du sujet à la hauteur mesurée. Au cours de la visite, le sujet a réalisé l'échauffement type prévu pour les séances ainsi que des CMJ de façon à augmenter l'expertise du saut. Le CMJ avec la barre et avec le gilet lesté a été aussi essayé. Des feedbacks correctifs ont été donnés afin d'améliorer la qualité du saut.

2.3.2 Les séances expérimentales

Les trois séances expérimentales ont toujours été similaires dans leur forme (annexe C et figure 4). Avec une durée de plus ou moins 45 minutes, elles commençaient avec l'échauffement du sujet. L'échauffement a toujours été réalisé dans les mêmes conditions d'altitude que les tests

en soi. Il consistait en une séance de 10 minutes de vélo sur un ergocycle à une cadence et charges libres. Puis, une intensité croissante a été demandée. Les dernières 3 minutes ont été réalisées à 70% de la capacité estimée du sujet. Après cela, 5 minutes ont été dédiées à des exercices de mobilité et stretching dynamique. Pour finaliser, une série de 6 sauts de CMJ a été réalisée en sous-maximale et sans charge. Pendant cette série, des feedbacks de correction ont été donnés par rapport à la réactivité du saut (il n'a pas été permis de s'arrêter dans la position de 90 degrés) et sur la hauteur à laquelle le sujet se baisse pour sauter afin d'assurer la bonne qualité du saut.

Après la partie de l'échauffement, une période de 3 minutes de repos a eu lieu, pendant laquelle l'appareil MYO a été placé sur le crist iliaque gauche du sujet et la mesure de la saturation périphérique en O₂ (S_pO₂) a été faite. Puis, les 5 sauts isolés ont été réalisés afin d'établir la relation F-V selon un ordre croissant de charge : 0% BW, 20% BW, 40% BW, 60% BW et 80% BW. Les sauts avec charges ont été effectués à l'aide d'une barre et des poids. Une période de 3 minutes de repos entre chaque saut a été concédée, pendant laquelle la S_pO₂ des sujets a été mesurée. À la fin de cette série, une période de 5 minutes de repos a été planifiée, avec mesure de la S_pO₂ et la prise de la valeur de la perception de l'effort (*rating of perceived exertion* ou RPE) [6-20] à travers l'échelle de Borg (1982), relative à toute la série. Avant de commencer le test des sauts répétés, la lactatémie a été mesurée. Le test des sauts répétés consistait en 20 sauts CMJ en 1 minute. Le premier test fut toujours à 0% BW et le deuxième à 30% BW. Entre les deux tests, il y avait un intervalle de repos de 20 minutes, avec mesure immédiate de la S_pO₂ à la fin du test, de la lactatémie à 3 minutes après la fin du test, et le RPE. Avant le test des sauts répétés à 30% BW, la lactatémie était mesurée de nouveau. Le test à 30% BW a été réalisé avec l'aide d'un gilet lesté. À la fin, la S_pO₂ a été mesurée, ainsi que la lactatémie, 3 minutes après la fin du test et la valeur de le RPE demandé. La consigne fut toujours de faire le saut le plus haut possible, soit pour les tests des sauts isolés, soit pour les tests des sauts répétés. Dans ce dernier cas, un encouragement standardisé a été verbalisé à tous les sujets pour qu'ils puissent donner leur maximum. La fréquence cardiaque (FC) a été mesurée au même moment que la S_pO₂ grâce à l'oxymètre des pouls. Toutes les données, telles les valeurs de la S_pO₂, FC, RPE et Lactatémie, ont été enregistrées immédiatement dans des fichiers Excel créés au préalable pour le test.

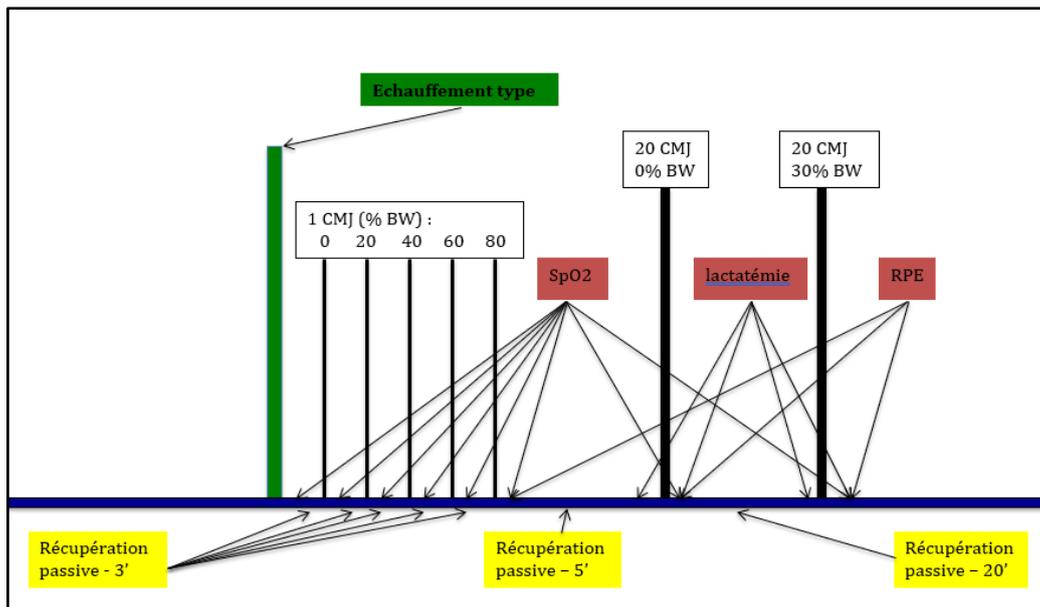


Figure 4. Protocole expérimentale d'une session.

En résumé le protocole se divise en sauts isolés et en sauts répétés, dont en trois moments :

- I. Sauts isolés de CMJ à 0, 20, 40, 60 et 80% BW ;
- II. Une série de 20 sauts répétés de CMJ en 1 minute sans charge ;
- III. Une série de 20 sauts répétés de CMJ en 1 minute à 30% BW.

2.3.3 Le CMJ

Le CMJ a été le seul saut utilisé pendant toutes les séances et tous les tests. Pour pouvoir réaliser tous les tests du protocole, il a été exécuté de deux manières différentes en ce qui concerne la position des mains. Pour les sauts isolés, une barre en plastique avec un poids négligeable et une barre de poids ont été utilisées. La première a été utilisée pour le saut sans charge et l'autre pour tous les sauts isolés avec charge de 20, 40, 60 ou 80% BW. Les deux sortes de barre ont été placées sur les épaules, les mains supportaient la barre et la bloquaient contre les épaules afin que celle-ci ne puisse bouger. Pour les sauts répétés, soit à 0% BW soit à 30% BW (à l'aide d'un gilet lesté), les mains ont été posées sur les crêtes iliaques. Le CMJ s'agit d'un saut électrodynamique qui peut donner des informations sur la partie excentrique et concentrique du saut et qui met en jeu le cycle d'étirement-contraction des muscles concernés. Dans le cadre de ce travail seulement la partie concentrique du saut intéresse. En ce qui concerne la partie technique du CMJ ; le sujet commence dans la position avec les mains posées sur les crêtes

iliaques ou en tenant une barre sur les épaules et les pieds parallèles entre eux. Pour les sauts isolés, lors du signal émis par l'appareil MYO, le sujet fait un mouvement rapide de descente avec la flexion des genoux et des hanches jusqu'à une hauteur formant un angle de 90°. La marque collée contre le mur a servi de référence pour cette hauteur. Après avoir atteint cette hauteur, le sujet fait une extension des genoux et hanches et une flexion plantaire d'une façon explosive afin d'atteindre la hauteur maximale de saut. La réception devait viser le même endroit du décollage avec une flexion minimale au niveau du genou. En ce qui concerne les sauts répétés, le protocole était le même soit pour la charge à 0% BW soit pour la charge à 30% BW. Comme les sujets ont dû répéter les sauts, ils étaient avertis lorsqu'ils devaient s'immobiliser le plus vite possible après la réception au sol, et en attendant le signal suivant. L'intervalle entre les deux signaux était de 3 secondes si la personne restait immobile à la suite du saut. Si ce n'était pas le cas, l'appareil MYO arrêta le test.

Les critères pour répéter chaque saut ou les sauts répétés ont été : a) le sujet s'apercevait qu'il avait manqué son saut ; b) le responsable a repéré une ou des fautes sur le saut ; c) l'appareil MYO n'a pas accepté le saut. Si une des trois situations se produisait, le saut était répété tout en respectant les temps de repos préétablis dans le protocole.

2.4 L'analyse des données

Les données ont été stockées pendant un certain moment dans l'appareil MYO et ont été par la suite téléchargées par le Logiciel Myotest Pro qui fait partie intégrante du produit. À partir de ce logiciel, les données ont été exportées sur des feuilles Excel. Dans ces feuilles, les moyennes et les écarts type furent calculés pour l'ensemble des données, c'est-à-dire, les valeurs prises directement pendant le protocole, SpO₂, FC, RPE et Lactatémie et aussi les données collectées par le MYO, F, V, P, MP et PP. Les valeurs de la hauteur du saut n'ont pas été prises en considération dans cette étude, car la hauteur d'un saut possède des composantes beaucoup plus complexes que celles qui ont été étudiées. L'orientation de la force à produire au sol semble plus importante que la force maximale en tant que telle (Morin et al., 2011). La performance d'un saut ne peut pas être éloignée de la technique d'application de la force, et ce travail ne cherchait pas à comprendre ces mécanismes.

La partie concentrique du saut a toujours été sélectionnée pour la prise des données. Pour les sauts isolés, la valeur maximale de force, vitesse et puissance a dû être retirée de l'ensemble des données extraits à chaque saut. En ce qui concerne les sauts répétés, les séries de 20 sauts

en 1 minute ont été toujours respectées. Les valeurs de la puissance moyenne (MP) ont été utilisés pour calculer la performance globale. La valeur maximale de puissance (PP) a été sélectionnée pour chacun des 20 sauts de la série pour analyser les effets de la fatigue dans la performance au long de la série. L'indice de fatigabilité (IF) utilisé fut le pourcentage de décroissance élaborée par Fitzsimons et al. (1993), cité par Glaister et al., (2008). Cet indice de fatigue est égal à la somme des PP de tous les sauts en divisant par le produit du nombre des sauts et le PP plus élevé, en multipliant par 100 et en soustrayant 100 (Glaister et al., 2008) : $IF = (100 \times (\text{somme des PP de tous les sauts} / \text{nombre des sauts} \times \text{PP plus élevé})) - 100$. Cet indice de fatigue a fourni la mesure la plus valable, la plus fiable et la plus sûre (Glaister et al., 2008). Des feuilles Excel ont été préparées avec l'ordre correct des données pour le traitement statistique requis pour ce travail.

2.5 Le traitement statistique

Un seuil de significativité de $p < 0,05$ a été considéré pour l'ensemble des analyses réalisées. Le traitement statistique des données a été effectué par le logiciel *Sigmaplot 11.0*. Pour toutes les analyses fut fait une analyse de la variance (*analysis of Variance* ou ANOVA) à deux voies à mesures répétées [intensité de la charge (0, 20, 30, 40, 60, et 80 % BW) ; F_iO_2 (N vs. HM vs. HS) pour déterminer les différences significatives de S_pO_2 , FC, Lactatémie, RPE, F, V, P, IF, MP, PP. Un post-hoc test de *Bonferroni* était utilisé pour localiser les différences dans le cas d'une interaction significative.

3. Résultats

3.1 Valeurs en repos

Dans le tableau suivant sont présentées les valeurs de repos de la S_pO_2 (% O_2), de la FC (bpm) et de la lactatémie (mmol/l) pour les trois conditions, N, MH et SH. Pour la S_pO_2 et la FC, les valeurs ont été prélevées avant les tests de sauts isolés, tandis que la valeur de lactatémie a été prise avant les tests de saut répétés.

Tableau 2 : Valeurs moyennes et écarts-types au repos de SpO_2 , FC et lactate. * $p < 0,05$ pour des différences avec N ; *** $p < 0,001$ pour des différences avec N ; # $p < 0,05$ pour des différences entre SH et MH ; ### $p < 0,001$ pour des différences entre SH et MH.

| | Conditions | | |
|------------------|-------------|-------------|--------------------|
| | N | MH | SH |
| S_pO_2 [%] | 95.4 ± 1.1 | 92.1 ± 2.3 | 82,6 ± 5.9 *** ### |
| FC [bpm] | 84.6 ± 16.9 | 91.4 ± 14.0 | 101.6 ± 12.4 *** # |
| Lactate [mmol/L] | 1.2 ± 0.3 | 1.5 ± 0.4 | 1.6 ± 0.4 * |

Pour faciliter la compréhension des résultats et pour répondre aux deux questions/ hypothèses, ceux-ci sont présentés en deux parties : la première partie fait référence aux sauts isolés ; la deuxième, aux sauts répétés. Dans la première partie, pour les sauts isolés, les résultats de P, F et V sont présentés ainsi que la RPE, S_pO_2 et FC. Dans la deuxième partie, pour les sauts répétés, les résultats de MP, PP et d'IF, ainsi que ceux de la lactatémie, RPE, S_pO_2 et FC, sont présentés.

3.2 Sauts isolés

Puissance (P) : Les figures ci-dessous montrent les valeurs de puissance atteintes pour les sujets lors des sauts de CMJ à 0, 20, 40, 60, 80% BW parmi les conditions N, MH et SH.

Premièrement pour la condition N, il a été observé que la puissance plus élevée a été produite lors du saut sans charge. Les diminutions de la puissance produite par rapport au saut à 0% BW ont été de 9.8%, 18.2% et 22.7% aux charges de 40, 60 et 80% BW respectivement.

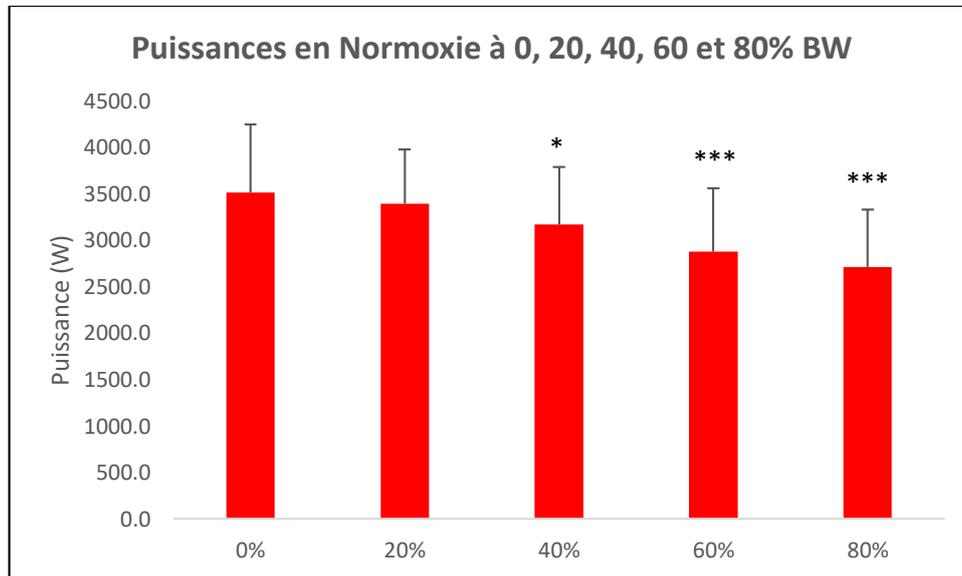


Figure 5: Puissances produites en condition de normoxie à 0, 20, 40, 60 et 80% BW. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour différences avec 0% BW.

Deuxièmement, pour la condition MH, la puissance produite la plus élevée est aussi à 0% BW. De plus, ont été observées une réduction de la puissance produite de 17.1% sur les sauts à 60% BW et une diminution de 20.1% à 80% BW.

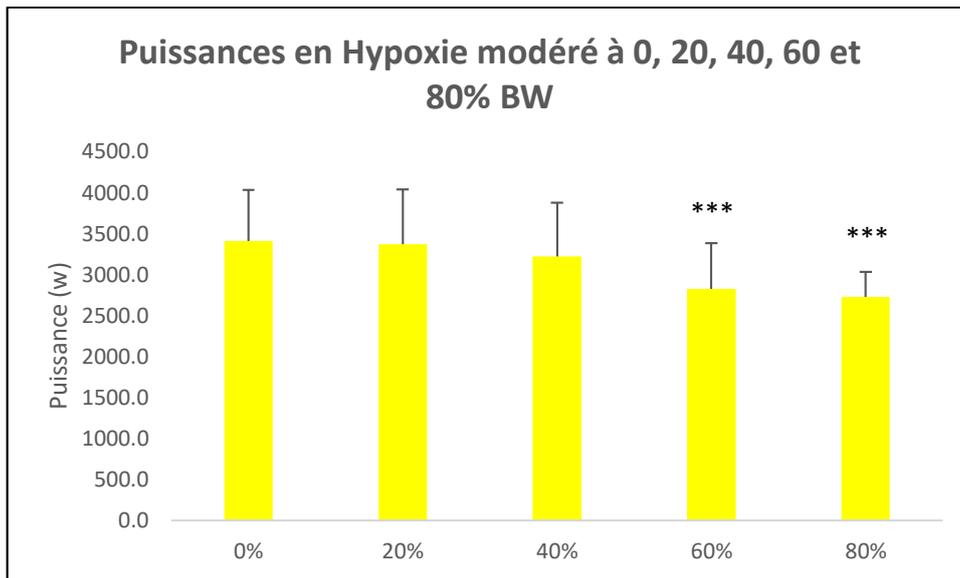


Figure 6: Puissances produites en condition d'hypoxie modéré à 0, 20, 40, 60, 80% BW. *** $p < 0.001$ pour différences avec 0% BW.

Finalement, pour la SH, les résultats ont démontré le même profil repéré lors de la MH, c'est-à-dire, la plus grande puissance a été observée lors du saut sans charge et une diminution des valeurs de puissance a été vérifiée à 60 et 80% BW. Les diminutions ont été de 16.6% à 60% BW et 16.9% à 80% BW.

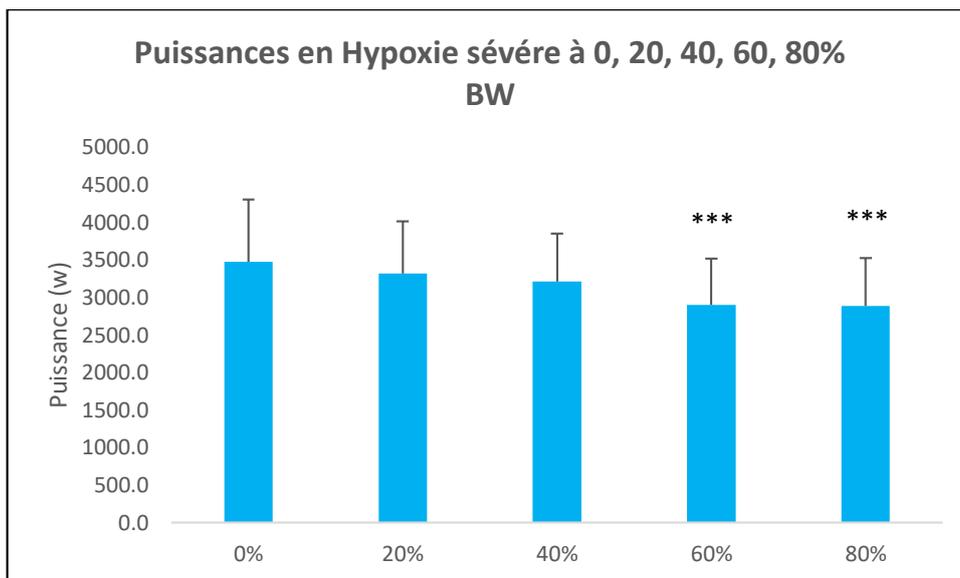


Figure 7: Puissances produites en condition d'hypoxie sévère à 0, 20, 40, 60, 80% BW. *** $p < 0.001$ pour différences avec 0% BW.

En ce qui concerne à la puissance, aucune différence significative a été retrouvée parmi les conditions N, MH et SH et cela quelle que soit la charge additionnelle en question. Les valeurs de force et vitesse ont aussi été mesurées à chaque saut. Elles vont dans le même sens que celles de la puissance, c'est-à-dire, pour chacune des charges aucune différence significative n'a été retrouvé entre elles. Le tableau suivant résume toutes les valeurs de puissance, force et vitesse mesurées pendant les CMJ isolés dans les trois conditions.

Tableau 3: Valeurs moyennes et écarts type de F, V, P pour les charges de 0, 20, 40, 60 et 80% BW sur les conditions de N, MH et SH lors des CMJ isolés et valeurs de signifiante (p).

| | | Conditions | | | |
|--------|---------|-------------|-------------|-------------|----------|
| | | N | MH | SH | P(ANOVA) |
| 0 %BW | F (N) | 1 819 ±29 | 1 924 ± 233 | 1 833 ± 214 | P>0,05 |
| | V (m/s) | 2.41 ± 0.26 | 2.32 ± 0.26 | 2.34 ± 0.39 | P>0,05 |
| | P (W) | 3 518 ± 732 | 3 412 ± 621 | 3 475 ± 824 | P>0,05 |
| 20 %BW | F (N) | 1 951 ±206 | 1 924 ± 233 | 1 932 ± 245 | P>0,05 |
| | V (m/s) | 2.10 ± 0.21 | 2.10 ± 0.24 | 2.05 ± 0.27 | P>0,05 |
| | P (W) | 3 395 ± 584 | 3 373 ± 670 | 3 320 ± 694 | P>0,05 |
| 40 %BW | F (N) | 2 042 ± 229 | 2 047 ± 257 | 2 025 ± 217 | P>0,05 |
| | V (m/s) | 1.84 ± 0.24 | 1.86 ± 0.23 | 1.85 ± 0.20 | P>0,05 |
| | P (W) | 3 174 ± 618 | 3 220 ± 656 | 3 208 ± 639 | P>0,05 |
| 60 %BW | F (N) | 2 135 ± 258 | 2 165 ± 202 | 2 139 ± 233 | P>0,05 |
| | V (m/s) | 1.58 ± 0.27 | 1.54 ± 0.23 | 1.59 ± 0.24 | P>0,05 |
| | P (W) | 2 878 ± 688 | 2 828 ± 555 | 2 899 ± 619 | P>0,05 |
| 80 %BW | F (N) | 2 255 ± 264 | 2 246 ± 163 | 2 271 ± 236 | P>0,05 |
| | V (m/s) | 1.4 ± 0.21 | 1.42 ± 0.11 | 1.48 ± 0.24 | P>0,05 |
| | P (W) | 2 717 ± 616 | 2 726 ± 310 | 2 886 ± 638 | P>0,05 |

Difficulté perçue de l'effort (RPE) : Les valeurs de la difficulté perçue de l'effort pour les sujets (RPE [6-20]) lors des sauts isolés ont été collectées. Ci-après, la figure illustre ces valeurs pour les trois conditions, N, MH et SH ainsi que les différences significatives. En moyenne les sujets ont perçu la difficulté de l'effort comme plus importante dans la condition d'hypoxie sévère. La valeur du RPE en SH a été 16.1% plus élevé qu'en N et 11.6% plus élevé qu'en MH. Aucune différence significative a été observer entre MH et SH.

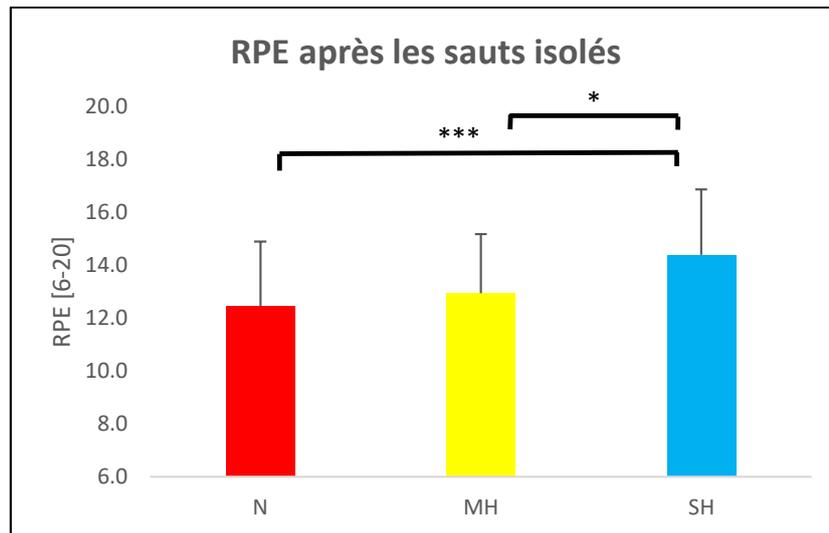


Figure 8 : RPE après les sauts isolés selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions.

Saturation en Oxygène (S_{pO_2}) : Les valeurs de S_{pO_2} ont été aussi mesurées à la fin de chaque saut. Les résultats présentés sont des moyennes des valeurs de la S_{pO_2} des 5 sauts à chaque altitude. Par rapport à la condition N, cette valeur était inférieure de 3.6% en MH et de 13.6% en SH. Elle était également inférieure de 10.4% en HH par rapport à la condition MH.

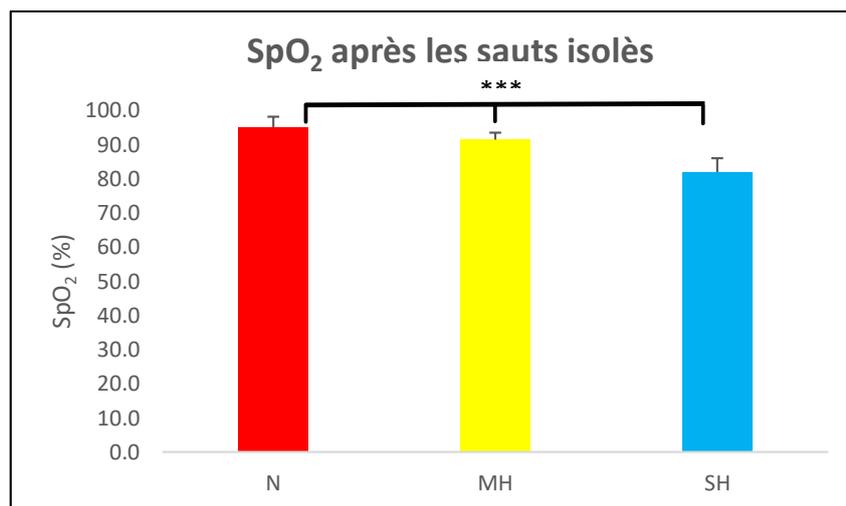


Figure 9 : Moyennes de la S_{pO_2} après les sauts isolés à 0, 20, 40, 60, 80% BW selon les 3 conditions, N, MH et SH. *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions.

Fréquence cardiaque (FC) : Les données de la FC qui sont présentés ci-dessous ont été produites de la même façon que ceux de la S_{pO_2} , c'est-à-dire, ils représentent les moyennes de FC collectées après chacun des 5 sauts isolés. Une augmentation de 14% entre SH et N et de 11.6% entre SH et MH ont été trouvées. Aucune différence significative entre MH et N.

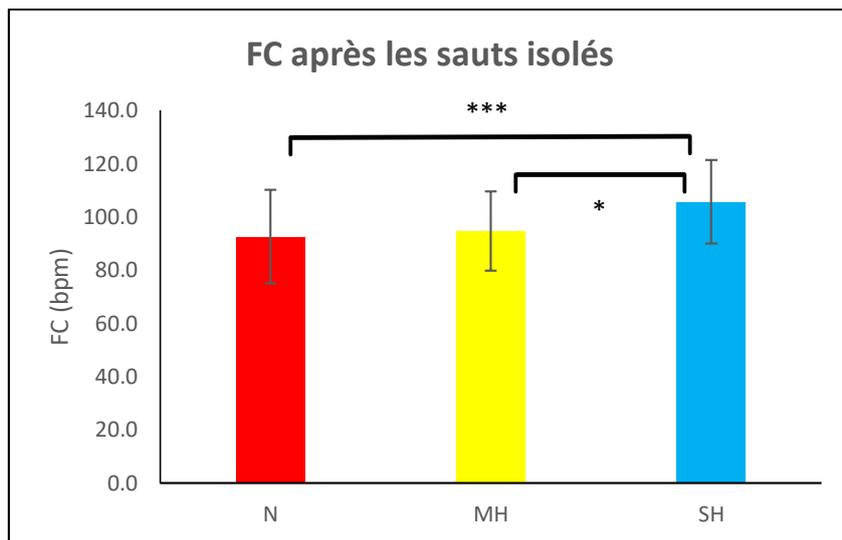


Figure 10 : Moyennes de la FC après les sauts à 0, 20, 40, 60, 80 % BW selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions.

3.4 Sauts répétés

Pour les sauts répétés, les sujets ont performé les sauts de 0% et 30% BW, toujours selon cet ordre.

Puissance maximale (PP) et puissances moyenne (MP) : Les MP et PP ont été mesurées dans la phase concentrique de chacun des 20 sauts répétés. Par rapport aux MP la figure suivante illustre l'absence de différence significative des valeurs trouvées à des différentes conditions et à des charges égales.

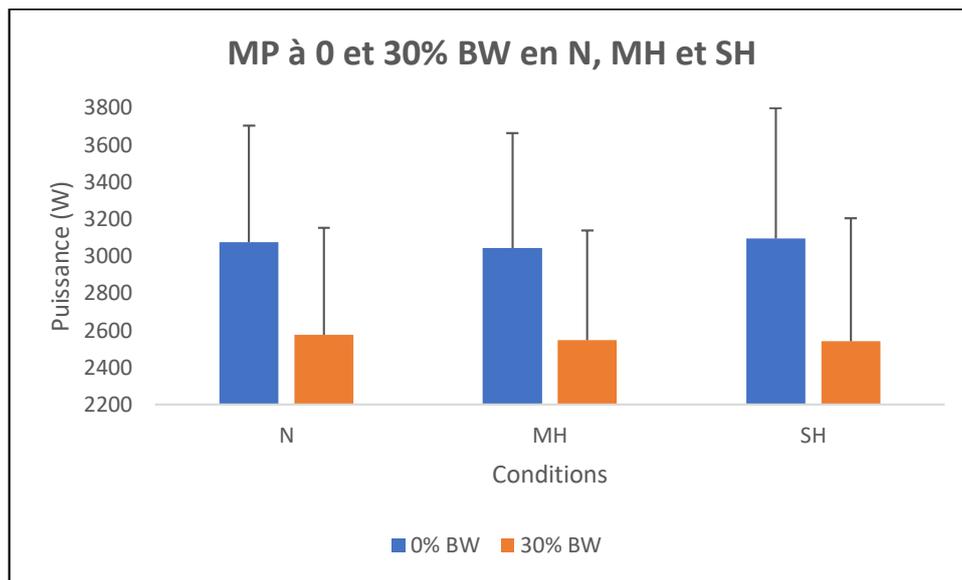


Figure 11: Puissance Moyenne (MP) à 0 et 30% BW selon les 3 conditions, N, MH et SH.

Les figures 12 et 13 montrent les moyennes des puissances maximales (PP) pour chaque saut et à 0 et à 30% BW. Dans ces deux situations, sans charge et à 30% BW le deuxième saut a été le plus puissant pour n'importe quelle condition, N, MH et SH.

À 0% BW (figure 12) a été observée une diminution de 15.4% en N, de 17.7% en MH et de 17.9% en SH entre le saut le plus puissant et le dernier saut de la série dans chaque condition. Ces différences sont significatives en N ($p < 0.05$) et en MH et SH ($p < 0.001$). Pour chaque saut analysé, il n'y a pas de différence significative entre les trois conditions.

Pour chaque condition et à une charge de 30% BW (figure 13), une diminution de 17.6% en N, de 17.6% en MH et de 21.4% en SH a été repérée entre le saut le plus puissant et le dernier saut de la série. Malgré le fait que ces diminutions sont toutes significatives seulement en SH la valeur de p est inférieure à 0.001. Comme dans la situation antérieure, à 0% BW, n'existe pas de différence significative entre les trois conditions pour chacun des sauts.

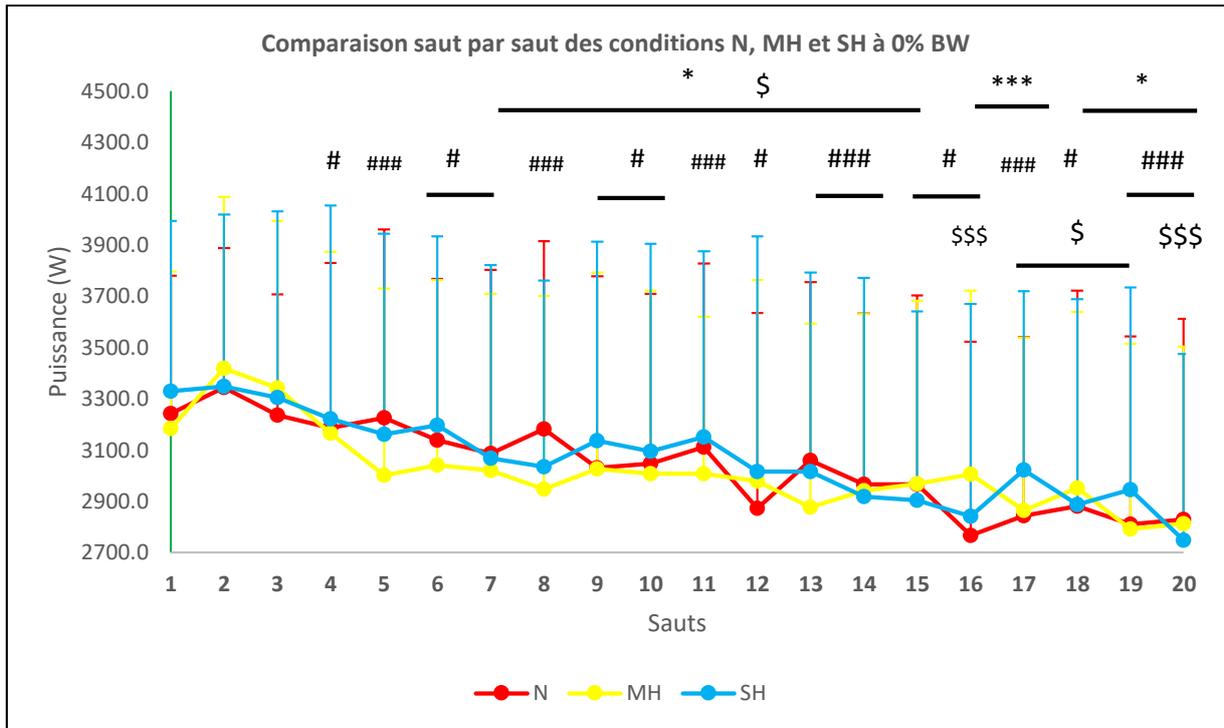


Figure 12: Puissance Maximale (PP) à chaque saut selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour différences avec 2^{ème} saut dans la série N ; # $p < 0.05$, ### $p < 0.001$ pour différences avec 2^{ème} saut dans la série MH ; \$ $p < 0.05$, \$\$\$ $p < 0.001$ pour différences avec 2^{ème} saut dans la série SH.

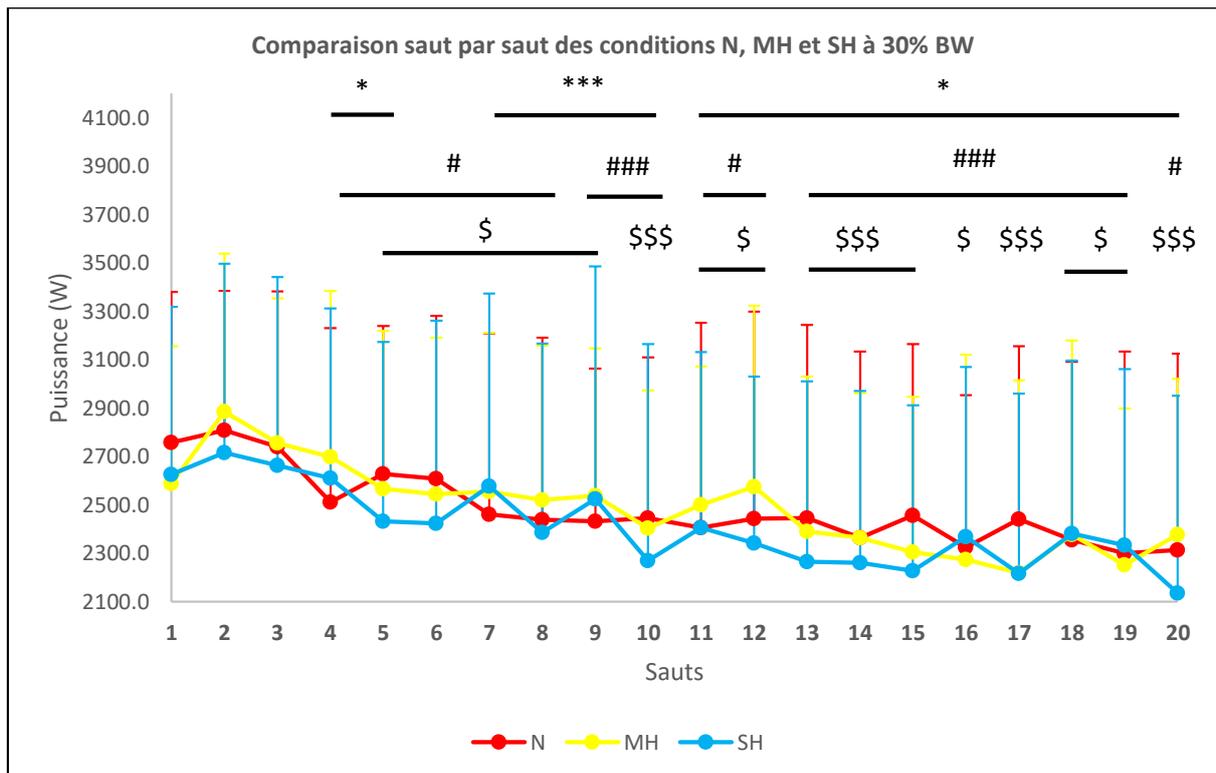


Figure 13: Puissance Maximale (PP) à chaque saut selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour différences avec 2^{ème} saut dans la série N ; # $p < 0.05$, ### $p < 0.001$ pour différences avec 2^{ème} saut dans la série MH ; \$ $p < 0.05$, \$\$\$ $p < 0.001$ pour différences avec 2^{ème} saut dans la série SH.

Le tableau suivant fait le résumé des valeurs trouvées concernant les deux variables, MP et PP.

Tableau 4: Valeurs de moyennes et écart-type de puissance(MP) et de puissance maximale (PP) à 0% BW et à 30% BW en N, MH et SH et valeurs de signifiante (p).

| | | Conditions | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| | | N | MH | SH | P(ANNOVA) |
| MP | 0 % BW | 3 076 ± 628 | 3 044 ± 618 | 3 097 ± 702 | P>0,05 |
| | (W) 30 % BW | 2 575 ± 578 | 2 547 ± 590 | 2 543 ± 660 | P>0,05 |
| PP | 0 % BW | 3 606 ± 620 | 3 630 ± 654 | 3 623 ± 776 | P>0,05 |
| | (W) 30 % BW | 3 055 ± 557 | 3 055 ± 683 | 3 028 ± 764 | P>0,05 |

L'indice de fatigue (IF) : L'IF a été aussi calculé. L'indice de fatigue est un résultat négatif, c'est-à-dire, plus il est négatif, plus la fatigue s'est installée pendant les sauts. Les deux figures présentées ci-dessous sont les moyennes et écarts type des indices de fatigue calculés pour les deux séries, 0% BW et 30% BW.

Quand comparées avec l'indice de fatigue sans charge (0% BW) parmi les trois conditions, N, MH et SH, nous n'observons pas de différence significative entre les valeurs obtenues.

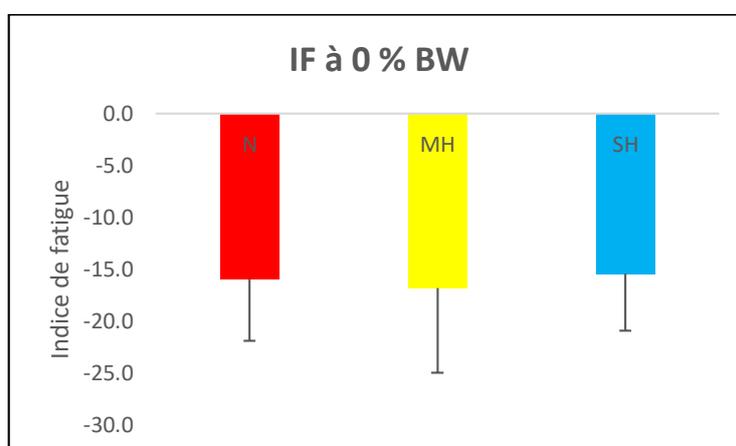


Figure 14 : Indice de fatigue (IF) sans charge selon les 3 conditions, N, MH et SH.

Par rapport à l'IF à 30 % BW, les résultats suivent la même tendance, c'est-à-dire, les différences existantes ne sont pas suffisantes pour établir une différence statistiquement significative entre les conditions. La figure ci-dessous illustre ces données.

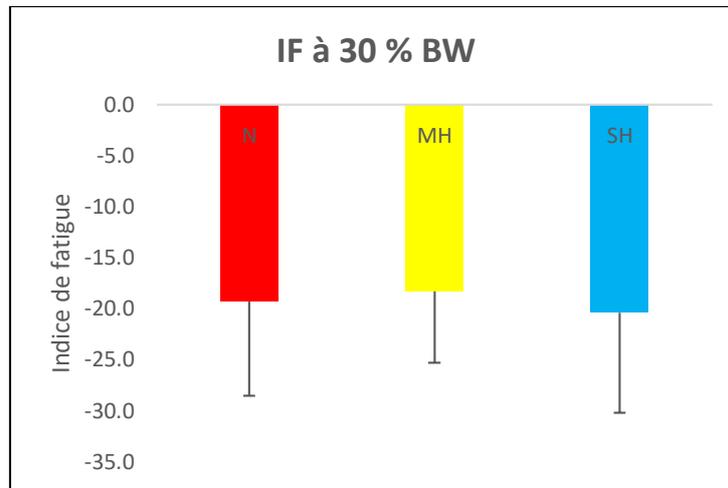


Figure 15 : Indice de Fatigue (IF) à 30 % BW selon les 3 conditions, N, MH et SH

Par contre, en analysant les valeurs de l'IF intra-condition a été observer une différence significative entre 0 et 30% BW en SH. En contradiction, cette différence significative n'est pas trouvée en N et en MH pour les mêmes paramètres. Le tableau ci-dessous met en évidence cette relation.

Tableau 5 : Valeurs moyennes et écart-type de l'indice de fatigue (IF) selon les 3 conditions, N, MH et SH à 0 % BW et à 30 % BW et valeurs de signifiante (p).

| | | Charge | | |
|----|----|-------------|-------------|--------------|
| | | 0 % BW | 30 % BW | P (ANNOVA) |
| IF | N | -16 ± 6 | -19,3 ± 9,2 | 0,128 |
| | MH | -16,8 ± 8,2 | -18,3 ± 7,0 | 0,493 |
| | SH | -15,4 ± 5,5 | -20,4±9,8 | 0,024 |

Lactatémie : En ce qui concerne le taux de lactate, la figure suivante illustre les résultats obtenus après la séquence de sauts à 0% BW pour toutes les conditions. La lactatémie était supérieure de 16% en SH par rapport à N. Il n'a pas d'autres différences significatives.

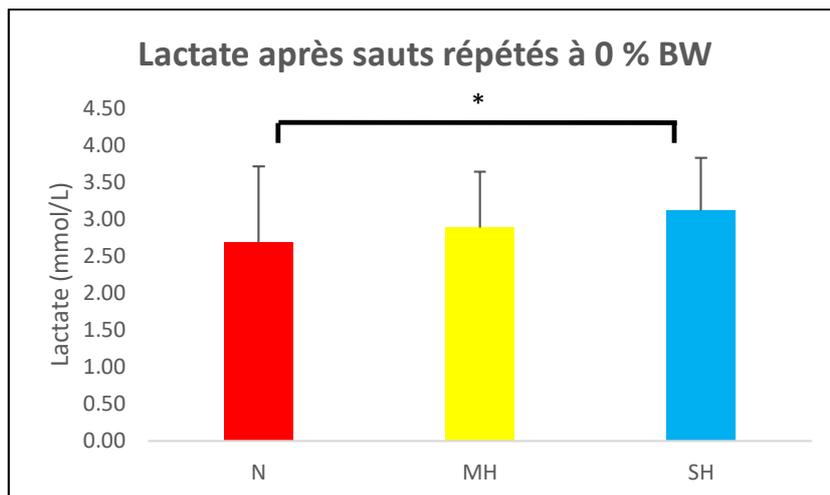


Figure 16 : Lactatémie après la série des sauts répétés sans charge selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$ pour les différences entre conditions.

En se focalisant sur les résultats avec la charge à 30 % BW, l'analyse relève des différences statistiques entre SH et N ($p = 0,003$), ce qui se traduit par une augmentation de 18.5% de la valeur de SH par rapport à N. Entre SH et MH, il a aussi été observé une différence significative ($p = 0,031$), c'est-à-dire, une augmentation de 13.5% en SH par rapport à MH. Par contre, la relation entre MH et N n'est pas significativement différente.

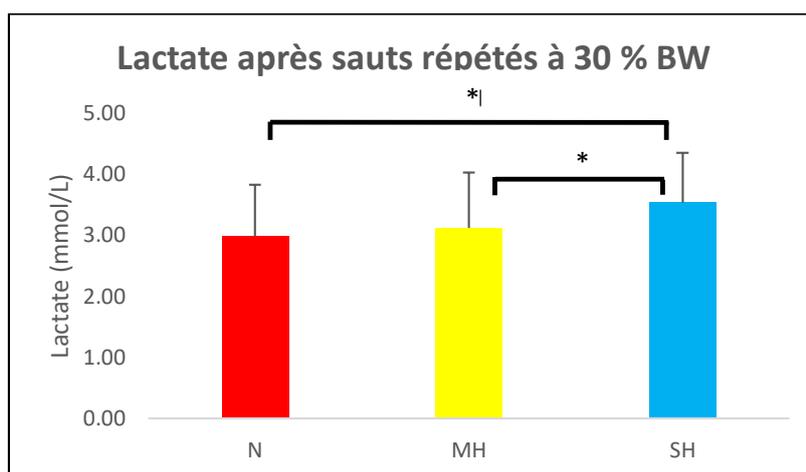


Figure 17 : Lactatémie après la série des sauts répétés à 30 % BW selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$ pour les différences entre conditions.

De plus, comme nous pouvons repérer dans le tableau 6, la comparaison des différents taux de lactate à la même condition d'altitude, met en évidence la présence d'une différence significative entre les charges de 0 % BW et de 30 % BW tant en condition SH qu'en condition N. Pour la condition MH il n'a pas été repérée de différence significative.

Tableau 6 : Taux de lactate (mmol/l) à 0 et 30 % BW selon les 3 conditions, N, MH et SH et valeur de signifiante (p).

| | | Charge % BW | | |
|------------------------|----|-------------|-------------|------------------|
| | | 0 % BW | 30 % BW | P (ANNOVA) |
| Lactatémie (mmol/l) | N | 2,68 ± 1,03 | 2,98 ± 0,84 | 0,013 |
| | MH | 2,89 ± 0,76 | 3,11 ± 0,9 | 0,052 |
| | SH | 3,11 ± 0,71 | 3,53 ± 0,82 | <0,001 |

Difficulté perçue de l'effort (RPE) : La RPE a été également mesurée après les sauts répétés. À 0% BW aucune différence significative n'a été relevée entre ces valeurs.

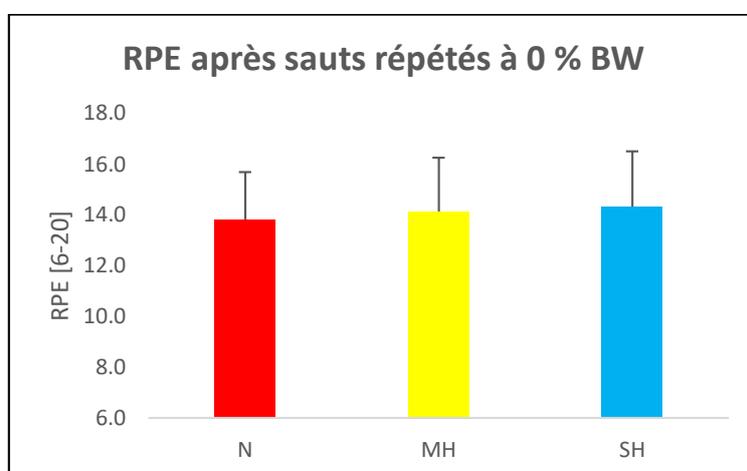


Figure 18 : RPE après la série des sauts répétés sans charge selon les 3 conditions, N, MH et SH.

En ce qui concerne la charge de 30 % BW, une différence significative a été révélée entre les valeurs de SH et de N. La valeur du RPE en SH est 9,4% supérieure qu'en N. En revanche, aucune différence n'a été retrouvée parmi les deux autres combinaisons possibles.

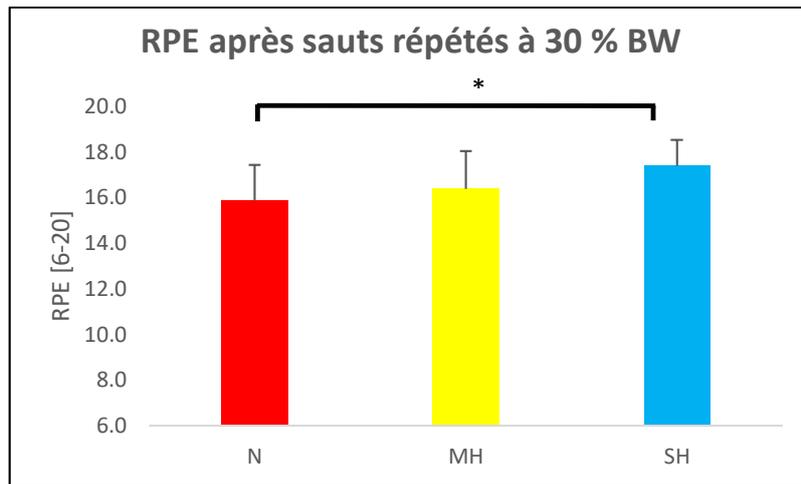


Figure 19 : RPE après la série des sauts répétés à 30 % BW selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$, pour les différences entre conditions.

Saturation en Oxygène (S_pO_2) : Par la suite, sont présentés les résultats de la mesure de la S_pO_2 faite après les sauts répétés. Par rapport à la condition N, cette valeur était inférieure de 4% en MH et de 16% en SH. Entre SH et MH une diminution de 12.5% de la valeur a été vérifiée.

Une comparaison avec la valeur de control (condition N avant les tests [$95.4\% \pm 1.1$]) et les valeurs après les sauts sans charge a permis de saisir les différences suivantes : une diminution de 3.5% en condition MH et une diminution de 12% en condition SH. Aucune différence a été retrouvée en N entre les valeurs avant et après les sauts.

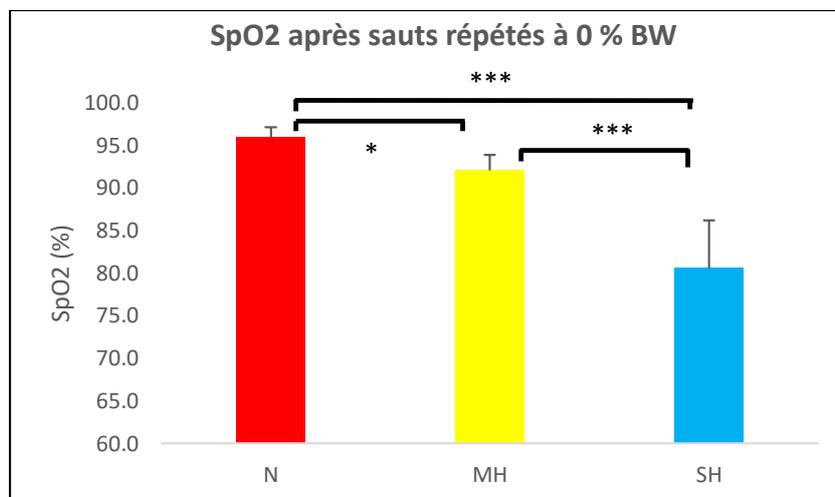


Figure 20 : SpO2 après la série de sauts répétés sans charge selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions.

Les résultats du SpO₂ concernant la charge de 30% BW suivent la même tendance que ceux du SpO₂ concernant la charge de 0% du BW : la condition N, a eu une valeur inférieure de 4.6% en MH et de 13.6% en SH et la condition MH e eu une valeur en SH inférieure de 9.5%.

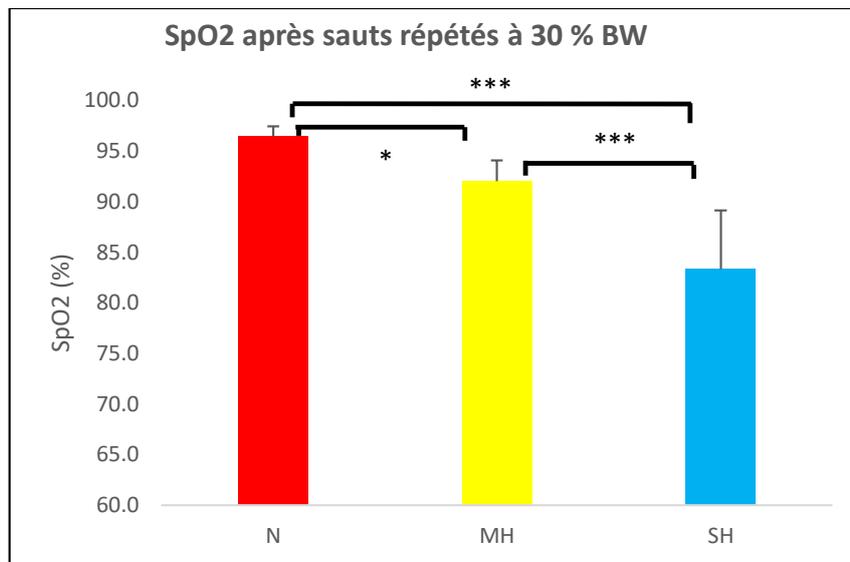


Figure 21 : SpO₂ après la série des sauts répétés à une charge de 30 % BW selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions.

Fréquence cardiaque (FC) : Pour conclure, sont présentés les résultats pour la FC. À une charge de 0% BW après la séquence des sauts, il a été mesuré en SH une différence de 11.4% et 13.5% pour N et MH respectivement. Pas de différence significative entre N et MH comme illustre la figure ci-dessous.

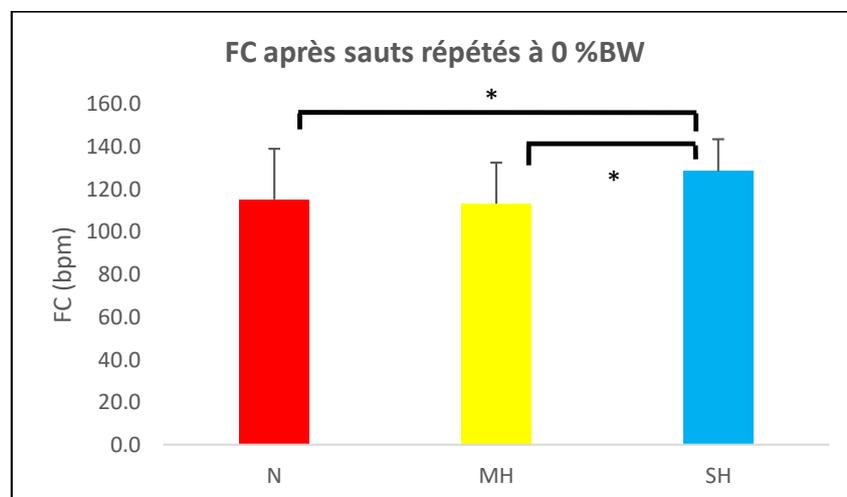


Figure 22 : FC après la série de sauts répétés sans charge selon les 3 conditions, N, MH et SH. * $p < 0.05$ pour les différences entre conditions.

Enfin, pour une charge de 30% BW, des différences significatives sont trouvées entre SH et MH avec une augmentation de 16.6% de la FC en faveur de SH et entre SH et N avec une augmentation de 12% en faveur de SH. Également, à 30% BW, aucune différence significative entre N et MH n'est à noter. Dans les différentes conditions, N, MH et SH, aucune différence significative n'a été trouvée entre les valeurs mesurées selon les charges de 0% et 30% BW.

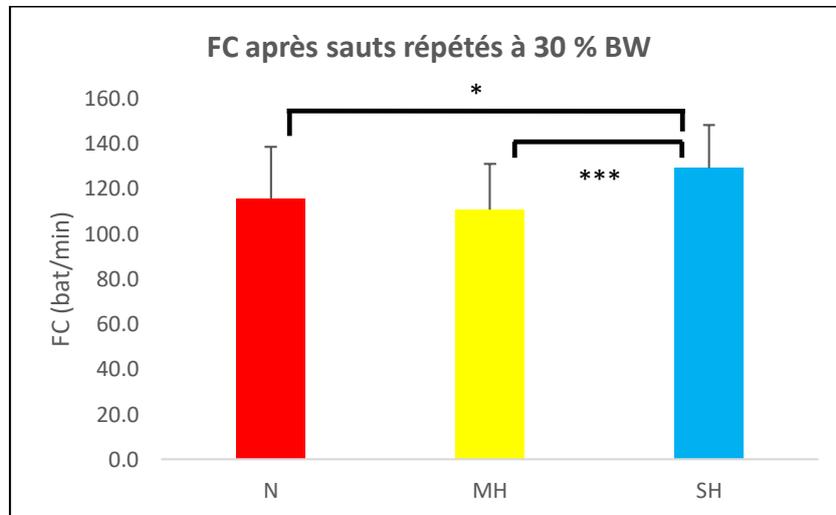


Figure 23 : FC après la série de sauts répétés à 30% BW selon les 3 conditions, N, MH et SH à une charge de 30 % BW. * $p < 0.05$, *** $p < 0.001$ pour les différences entre conditions.

4. Discussion

La présente étude s'intéressait à deux thèmes principaux en lien avec les effets de l'hypoxie aiguë simulée. Pour ce faire, diverses variables ont été analysées en trois conditions différentes : N, MH et SH. Subséquemment, il s'agissait de relever les différences significatives parmi des valeurs des variables étudiées entre chacune des conditions.

La première était d'analyser l'effet de l'hypoxie aiguë sur des sauts de CMJ isolés à travers la méthodologie de la courbe F-V. En effet, les résultats trouvés vont dans le sens de l'hypothèse élevée et des recherches précédemment publiées.

La deuxième était d'analyser les effets de l'hypoxie aiguë lors des sauts de CMJ répétés. Dans ce cas, les résultats ne vont pas entièrement dans la direction de l'hypothèse en vue ; les différences sur la performance globale et sur l'Indice de Fatigue parmi les conditions ne sont pas significatives. Désormais, dans les autres variables étudiées, quelques différences significatives ont été trouvées, ce qui peut amener à la clarification du sujet.

Les paragraphes qui suivent essaient d'expliquer les résultats en détail pour la meilleure compréhension du sujet.

4.1 Les sauts isolés

Comme il est possible de vérifier dans le tableau 3 du chapitre précédent, il n'y a pas de différences significatives pour les trois variables mesurées, F, V et P, pour des charges visées, 0, 20, 40, 60, 80% BW entre les conditions stipulées, N, MH et SH. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Feriche et al. (2014) et Scott et al. (2015), selon lesquels les bénéfices de l'hypoxie normobarique ne sont pas observés pendant les actions courtes et explosives représentées par les courbes F-V, que ce soit l'hypoxie modérée ou sévère. À l'inverse, l'hypoxie hypobarique semble avoir un effet clair sur les valeurs de la relation F-V. La jonction de la moindre résistance de l'air en altitude (Hamlin et al., 2015 ; Levine et al., 2008 ; Hahn et Gore, 2001) et l'hypoxie améliore les valeurs de la relation F-V. (Feriche et al., 2014), notamment la vitesse et, par conséquent, la puissance. Dans leur revue, Feriche et al. (2017) soulignent encore que la relation entre HH et la fonction musculaire doit converger en un bénéfice supérieur pour la performance des mouvements explosifs courts en HH, mais pour l'instant, la science n'a pas pu découvrir avec exactitude quels sont les facteurs responsables pour la différence trouvée entre des résultats de HH et NH. Ces conclusions sont tirées des

résultats de la recherche de Garcia-Ramos et al. (2016), qui ont utilisé aussi une plateforme de force pour mesurer les paramètres de la relation de force/vitesse à la place d'utiliser seulement un transducteur linéaire de vitesse. Les résultats sur la plateforme de force ont montré une augmentation dans tous les paramètres. Ce protocole a éliminé le facteur physique (moindre résistance aérodynamique en altitude) comme le seul responsable pour les vitesses majeures atteintes en altitude.

En même temps, les résultats obtenus sur les valeurs prises de la S_aO_2 sont significativement différents entre toutes les conditions analysées. En vérité, la relation entre la baisse de la valeur de la S_aO_2 avec la montée en altitude réelle ou simulée a été bien établie (Edwards et Polman, 2013). Ces résultats suivent la même tendance que d'autres travaux sur des mouvements brefs et explosifs réalisés en hypoxie normobarique aiguë (Scott et al., 2015, Alvarez-Hermes et al, 2015). Autrement dit, le niveau d'hypoxémie était en réalité différent entre les conditions de N, MH et SH, mais ce fait n'a pas eu des effets sur les résultats d'une action explosive courte (<5 s plus 3-5 min de récupération). Spécifiquement, cela met encore plus en évidence qu'en hypoxie normobarique, en ce qui concerne l'action explosive isolée d'un CMJ, la diminution de la S_pO_2 n'impacte pas les valeurs des paramètres de la relation F-V.

C'est connu que l'hypoxie, notamment l'insuffisance en oxygénation cérébrale, diminue l'activité électrique des neurones (Amman et Kaiser, 2009). Quelques études ont mis en relation la diminution de l'oxygénation du cortex préfrontal en condition aiguë d'hypoxie ($F_iO_2 = 13\%$, ~ 3500 m) avec des anomalies de fonctionnement musculaire en sprints de 10 s (Smith et Billaut, 2010). Cependant, pour des actions isolées explosives courtes, comme cela a été évalué dans cette recherche (<5 s plus 3-5 min récupération), l'effet dû au manque d' O_2 n'a pas été observé ni en MH ($F_iO_2 = 16.9\%$ ~ 2000 m) ni pour SH ($F_iO_2 = 12.9\%$ ~ 3800 m) en ce qui concerne la F, V et P. D'ailleurs, ces résultats sont en accord avec celles trouvées dans le travail de Feriche et al. (2014). Enfin, semble-t-il que la différence dans la durée de l'effort (10 s sprint vs < 5 s saut) soit responsable de la différence entre les résultats.

Par rapport à la RPE, l'échelle qui vise à mesurer la difficulté ressentie par les sujets, il a été trouvé une différence plus élevée entre SH et N (16.1%) qu'entre SH et MH (11.6%). Aucune différence significative a été retrouvée entre les conditions N et MH. Ces résultats mettent en évidence les effets de la SH sur la difficulté ressentie par les sujets. De la littérature revue

concernant l'exposition aiguë (voir tableau 1) seulement le travail de Scott et al. (2015) s'est intéressé à mesurer la difficulté ressentie des sujets ; en l'occurrence, aucune différence significative n'a été trouvée entre les valeurs de RPE parmi les conditions étudiées (N, $F_{iO_2} = 0.21\%$; MH, $F_{iO_2} = 0.16\%$; SH, $F_{iO_2} = 0.13\%$). De ce fait, il y a un décalage entre les résultats aperçus dans le présent travail et celui de Scott et al. (2015) qui peut être expliqué par le fait que pour l'étude de Scott et al. (2015) des athlètes confirmés en entraînement contre-résistance ont été sélectionnés, ce qui peut avoir une influence sur les résultats, tandis que pour cette étude, des athlètes de sports collectifs non pratiquants de l'haltérophilie ou de l'entraînement de musculation ont été sélectionnés. De plus, d'autres études ont mis en relation l'hypoxie et l'entraînement de résistance en utilisant l'échelle de Borg pour monitorer l'effort perçu. Parmi ces études, seulement le travail de Manimmanakorn et al. (2013) a souligné une différence significative entre les conditions d'IHRT, BFR et N. Selon les chercheurs, cette valeur plus grande de la RPE a en relation un stress métabolique plus élevé, une hypertrophie plus grande et des améliorations au niveau de la force après 4 semaines d'entraînement. Dans le présent travail, l'augmentation de la valeur de la RPE en relation avec l'augmentation de l'altitude ne se traduit pas par des valeurs plus élevées de F, V ou P. Peu de travaux dans ce domaine de recherche ont utilisé l'échelle RPE pour monitorer l'effort ; il est donc difficile de saisir une tendance et faire des comparaisons. Cependant, à la lumière de la connaissance d'aujourd'hui, il n'est pas possible d'expliquer les mécanismes qui sont la cause de ces valeurs ; de ce fait, Scott et al. (2014) soulignent que d'autres études sur la perception d'effort en RTH/IHRT sont nécessaires.

4.2 Les sauts répétés

En ce qui concerne les sauts répétés, aucune différence significative n'a été trouvée pour l'IF entre les trois conditions, N, MH et SH, ni pour les sauts sans charges ni pour les sauts à 30% BW. Ces résultats sont en opposition avec ce qui a été postulé comme hypothèse. Cependant, quelques différences entre le saut à 0% et à 30% BW sont à considérer. Tandis qu'à 0% BW, les sauts effectués en N et MH ont un IF plus grand qu'en SH, à 30% BW, il se passe exactement le contraire (i.e., sauts en SH ont un IF plus élevé). D'ailleurs, un regard sur les résultats de l'IF intra-condition entre les deux charges permet d'identifier une seule différence significative, notamment dans la condition SH (voir tableau 4 dans le chapitre précédent). Cela dit, dans la condition SH, il existe une différence significative de l'IF entre les sauts sans charges et les

sauts à 30% BW ($p < 0.05$). On peut donc conclure que l'impact de la charge sur la fatigue du sujet a eu lieu seulement en SH.

L'hypothèse qui avait été énoncée se basait sur la possible diminution de la commande centrale à cause de l'exposition à une altitude sévère ($F_iO_2 = 12.9\% \sim 3800$ m), d'où un possible IF plus grand dans cette condition. D'un côté, dans le travail de Feriche et al. (2014), il été avancé qu'en hypoxie normobarique, seulement une $S_pO_2 < 82\%$ (> 3500 m) (Amaan et Kaiser, 2008) serait nécessaire pour provoquer une réduction de l'oxygénation dans le cerveau, suffisamment conséquente pour déclencher une réduction dans l'activité électrique qui aboutirait à une diminution de la puissance dégagée et, en conséquence, de la performance. D'un autre côté, Amaan et al. (2007) ont proposé que la prédominance de l'hypoxie du CNS sur la fatigue musculaire périphérique influençant la commande motrice centrale, et donc la performance de l'exercice, se situe au-dessous d'un niveau de transport d' O_2 qui est représenté par une S_aO_2 entre 70 et 75 %. Le tableau 2 du chapitre précédent montre, entre autres, les valeurs de la S_pO_2 avant le début des séries des tests en chacune des conditions : $95.4 \pm 1.1\%$ en N, $92.1 \pm 2.3\%$ en MH et $82.6 \pm 5.9\%$ en SH. En ce qui concerne la condition SH, en tenant compte des valeurs qui sont annoncées par Amaan et al. (2007) à partir desquelles il pourrait y avoir une prédominance de l'hypoxie du SNC sur les muscles, diminuant ainsi la performance, ce qui impacterait l'IF, il se constate que la valeur de la S_pO_2 n'est pas suffisamment basse pour atteindre ce niveau, et donc l'absence des différences significatives d'IF sont expliquées. Par contre, si ce sont les valeurs de Feriche et al. (2014) qui sont prises en compte, la conclusion devient plus complexe. En fait, la valeur de 82 % est atteinte en SH dans notre étude, mais l'IF n'était pas significativement différent. En réalité, en SH, avec la charge de 30% BW, même si l'IF n'est pas significativement différent, il est plus grand. La valeur parvenue de S_pO_2 est dans le seuil annoncé par Feriche et al. (2014) et probablement, il avait besoin d'aller un peu au-delà de cette condition ($F_iO_2 12,9\% ; \sim 3800$ m) pour avoir un manque d' O_2 conséquent au niveau cérébral et déclencher toutes les réponses revues précédemment.

Dans un autre point de vue, divers travaux ont confirmé qu'à des altitudes extrêmement sévères (>5500 m), une détérioration musculaire et une diminution de la fonction musculaire ont été reportées (Raguso et al., 2004 ; Fiori, et al., 2000 cités par Feriche et al., 2014), tout comme une diminution de la puissance musculaire (Ferreti et al., 1990). Finalement, il apparaît que, pour arriver à déclencher un stress métabolique afin d'améliorer les réponses de la fonction musculaire, il faudra aller à des altitudes entre 4 000 et 5 500 mètres. D'autres travaux seront nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Il a été souligné qu'il y avait une différence significative entre les IF à 0 et à 30 % BW dans la condition SH. Comme expliqué dans le paragraphe ci-dessus, l'altitude atteinte n'était pas suffisante pour provoquer des réponses au niveau du CNS visibles sur les résultats d'IF ou MP et PP, mais cette différence significative peut signifier que l'altitude ainsi que la charge peuvent ensemble déclencher un stress métabolique supérieur. Cela dit, on peut penser que, en ce qui concerne l'entraînement de résistance, la jonction d'une charge à une condition d'altitude sévère semble être capable de déclencher des réponses métaboliques supérieures sans avoir la nécessité de simuler des altitudes encore plus hautes. Ce raisonnement est aussi soutenu par les résultats trouvés en utilisant l'échelle de Borg. En effet, aucune différence significative n'a été trouvée entre les conditions sans charges, mais une différence significative ($p < 0.05$) entre SH ($17,4 \pm 1,1$) et N ($15,9 \pm 1,5$) a été trouvée avec la charge préconisée. Ce résultat renforce l'idée de l'impact de la charge sur les conditions. En fait, une plus grande hypoxémie est liée à une plus grande perception d'effort dès que la charge de 30% BW est additionnée aux sujets pendant les sauts. La comparaison avec le travail d'Alvarez-Hermes et al. (2015) sur les sauts répétés en conditions d'hypoxie aiguë montre des similitudes, notamment la différence significative entre HH et N trouvée dans les résultats de RPE.

Girard et al. (2017), dans le cadre de la répétition des sprints, rappelle qu'une valeur diminuée de la S_pO_2 peut probablement contribuer à la fatigue pendant l'effort. Cela est dû au fait que la resynthèse de la phosphocréatine et l'absorption de H^+ sont des processus nécessitant de l' O_2 . Cette hypothèse des processus liés à la fatigue périphérique n'a pas été confirmée pendant cette étude ; ainsi, l'IF n'a pas été altéré. Le caractère sous-maximale de l'effort demandé peut être à l'origine de ceci.

Un autre point également intéressant est la différence entre les valeurs de la S_pO_2 avant le début des séries et après la série de sauts répétés parmi les différentes conditions. Avant les tests, il a été mesuré une valeur de S_pO_2 moyenne de $95.4 \pm 1.1\%$ pour tous les sujets. Si, par exemple, nous prenons en compte la situation sans charges, nous constatons une décroissance de la S_pO_2 plus prononcée en SH ($80.6 \pm 5.6\%$), moins prononcée en MH ($92.1 \pm 1.8\%$) et négligeable en N (95.9 ± 1.1). Cela signifie que, pour des valeurs de MP et PP similaires, ainsi que pour des valeurs d'IF, également similaires pour toutes les conditions, il apparaît que les sujets sont aptes

à maintenir une puissance similaire, tandis que la S_pO_2 diminue dans les conditions d'hypoxie, ce qui peut démontrer une production majeure anaérobie en conditions hypoxiques (Calbet et al., 2002). La même tendance a été vérifiée chez Alvarez-Hermes et al. (2015).

D'après la revue de la littérature, seulement le travail d'Alvarez-Hermes (2015) a utilisé l'hypoxie aiguë (N, $F_iO_2 = 21\%$; MH, $F_iO_2 = 16,5\%$; SH, $F_iO_2 = 13,5\%$) pour mesurer les résultats lors d'un test de sauts répétés, à l'occurrence 15 s sur le tapis de Bosco, afin de mesurer la puissance maximale anaérobie. Il existe une différence entre le protocole de ce travail (15 s sauts répétés sans pause) et celui présenté dans cette étude (20 sauts répétés de CMJ en 60 s). Toutefois, la nature du test est similaire, ce qui permet de comparer quelques résultats. Les résultats du travail d'Alvarez-Hermes (2015) montrent une différence significative entre SH et N en ce qui concerne MP, tandis qu'aucune différence significative n'a été trouvée en PP. Dans notre travail, il n'y a pas de différences significatives entre les conditions en MP ni en PP (voir tableau 4 du chapitre précédent), ce qui est en harmonie avec le travail d'Alvarez-Hermes (2015) en ce qui concerne la PP. A propos de la PP, les différences intra-condition, entre le saut le plus puissant et le dernier saut de la série, sont significatives pour toutes les conditions d'altitude. Cependant, soit sans charge [N (15.4%), MH (17.7%) et SH (17.9%)] soit à 30% BW [N (17.6%), MH (17.6%) et SH (21.4%)], les diminutions de la PP sont toujours supérieures pour la condition SH et cette diminution est plus marquée dans la situation de 30% BW. Ce fait, met en évidence l'impact que la charge, en plus de la condition SH, semble avoir dans les variables mesurées. Dans le même sens de cette étude, Scott et al. (2015) n'ont également pas trouvé de différences significatives sur MP et PP dans leur recherche sur l'exercice *back squat* en conditions de normoxie, hypoxie aiguë modérée et sévère. En analysant la performance globale (MP), il reste clair que l'exposition aiguë normobarique à MH et SH n'impacte pas négativement la capacité de produire une puissance anaérobie pendant un exercice de sauts répétés en 1 minute.

Le taux de lactatémie a été aussi mesuré après chaque série de sauts répétés. L'analyse statistique relève des différences significatives entre SH et N ($p < 0.05$) pour les sauts sans charges, tandis que pour les sauts avec une charge de 30% BW, des différences significatives ont été trouvées entre SH et N ($p < 0.05$) et SH et M ($p < 0.05$). Ces résultats montrent que, sans charges, pour maintenir la même MP dans les trois conditions différentes, les sujets produisent

davantage d'acide lactate en SH qu'en N. Dans la condition à 30%, pour maintenir la même capacité à produire une puissance tout au long de l'exercice, les sujets ont produit plus de lactate en SH qu'en MH et N, ce qui va dans le sens d'une plus grande demande musculaire pour l'effort avec la charge de 30% BW, par rapport à la condition sans charges. Il est intéressant de vérifier qu'en intra-condition, c'est-à-dire quand sont comparées les valeurs trouvées à 0 et à 30% BW dans chacune des conditions, la différence est significative dans la condition SH ($p < 0.001$), non significative en MH et significative en N ($p < 0.05$). Ce fait souligne que l'impact de la charge de plus 30% du poids du corps sur les sujets (+ 30% BW) est plus prononcé en SH qu'en MH et N. Globalement, ces résultats sont contraires à ceux trouvés dans le travail d'Alvarez-Hermes (2015) qui ne trouve aucune différence significative entre les conditions. Le fait que le type d'effort soit différent entre les deux travaux peut être à l'origine de ces différences. Dans le travail d'Alvarez-Hermes (2015), les valeurs du taux de lactate entre 7.5 et 7.9 mmol/l ont été mesurées, ce qui confirme le caractère maximal du test dans toutes les conditions, tandis que nos valeurs absolues pour le lactate sont entre 2.68 et 3.53 mmol/l, ce qui confirme le caractère sous-maximal de l'effort. Cependant, il a été suggéré que dans un environnement pauvre en O_2 , la faible pression en O_2 peut être à l'origine de l'accumulation de métabolites musculaires tels que le lactate ou l'hormone de croissance (Girard, 2017), ou encore, plus spécifiquement, il a été spéculé que la réduction de la concentration en O_2 , pendant des efforts intermittents à haute intensité en hypoxie aiguë, peut résulter dans l'augmentation de la concentration du lactate due à une participation majeure du métabolisme anaérobie (Calbet et al., 2003). Donc, les résultats trouvés vont dans ce sens-là, avec une augmentation de la concentration du lactate corrélée avec l'augmentation de l'altitude. On observe donc encore un impact de la charge de 30% sur cette augmentation du lactate.

4.3 Limites et forces du travail

Lors d'un travail scientifique, les limites sont toujours présentes, même si de plus en plus, les chercheurs essayent de les supprimer. Dans ce travail, les sujets pratiquent tous des sports collectifs. Désormais, il était plus indiqué d'avoir une population d'un seul sport collectif, pour pouvoir faire des conclusions plus spécifiques sur l'entraînement de force/explosivité des membres inférieurs par rapport au sport pratiqué. En même temps, le niveau d'expertise sur le saut de CMJ parmi les sujets peut possiblement ne pas être le même, dû justement à la pratique systématique différenciée vécue par les sujets dans leur sport spécifique. Or, la visite préliminaire décrite dans la méthode a eu comme objectif de diminuer les possibles écarts

existants. En ayant des sujets pratiquant différents sports, notamment le volley, le basket et le football, il était indiqué d'avoir un minimum de 12 participants pour chaque sport pour pouvoir faire un travail statistique valable et pouvoir comparer les résultats parmi les sports. Des difficultés logistiques trouvées au niveau de l'adhérence des participants n'ont pas permis de réunir ces deux conditions.

L'utilisation de la plateforme de force, reconnue comme le « gold standard » pour les mesures sur les sauts, pouvait être un atout pour ce travail. Une fois de plus, des difficultés d'ordre logistique n'ont pas permis de l'avoir. Cette situation a conduit au choix de l'appareil Myotest pour prendre les mesures. Lors des sauts répétés, l'appareil Myotest est limité en soi : il ne peut pas enregistrer les données des sauts qui sont vraiment consécutifs. L'appareil a besoin d'un intervalle de temps pour se recalibrer et être prêt pour le saut suivant. Ainsi, nous étions obligés d'enregistrer seulement 20 sauts toutes les 60 secondes. Avec une fréquence de sauts plus grande, nous pourrions probablement avoir des résultats différents.

Le caractère innovateur de cette recherche est sans aucun doute son point fort. Le travail de contre-résistance est déjà très prometteur en soi au niveau de l'augmentation de la performance du saut. En utilisant la WR pour le travail de contre-résistance, cela a nettement augmenté le travail en spécificité, notamment au niveau des circuits neuromusculaires. La possibilité d'en faire une ambiance hypoxique, avec les avantages qui viennent du manque d'O₂ pour l'entraînement, peut élever l'entraînement de contre-résistance à un niveau d'excellence. À notre connaissance, c'est la première fois que des sauts répétés pendant une durée considérable – une minute – ont été analysés en ambiance hypoxique et que la fatigabilité des sujets pendant les séries a été évaluée. L'utilisation des WR a eu un rôle très important pour cela, parce qu'il était très difficile et dangereux pour les sujets de faire un protocole de sauts répétés si long avec une charge portée sur une barre. Celle-ci pouvait amener à des déséquilibres qui impacteraient non seulement les résultats, mais aussi la santé des sujets. La fatigabilité est souvent utilisée comme mesure sur d'autres types de recherche en sciences du sport, notamment sur la capacité à répéter des sprints ; mais à notre connaissance, cela a été pour la première fois utilisé en RTH.

4.4 Perspectives

Comme il a été souligné à plusieurs endroits dans cette étude, la possibilité de faire des travaux scientifiques en RTH/IHRT à des altitudes simulées plus sévères doit être considérée dans l'objectif de savoir si un manque d'oxygène plus prononcé impacte la fatigabilité des sujets. En partant de ce point, des recherches plus complexes que celle-ci, dans le sens de comprendre quels sont les enjeux derrière une possible augmentation de la fatigue lors de l'entraînement des sauts répétés, sont à considérer. Également, des futures recherches dans le domaine des sauts répétés doivent essayer d'amener les sujets à produire des efforts plus conséquents, voire l'effort maximale dans l'objectif d'avoir des données relatives à la RTH, qui permettent d'analyser cette problématique avec beaucoup plus de détail.

5. Conclusion

L'objectif de ce travail visait à étudier les effets de l'hypoxie aiguë sur des sauts isolés et des sauts répétés de CMJ. Autrement dit, il s'agissait d'évaluer l'efficacité de l'impact de l'hypoxie aiguë simulée à 2 000 et 3 800 mètres pour le mouvement supra-cité. Pour ce faire, différentes variables ont été mesurées : la F, la V, la P, la S_pO_2 , la FC et le RPE pour les sauts isolés. La MP, la PP, la S_pO_2 , la lactatémie, la FC et le RPE, ainsi que l'IF ont été calculés pour les sauts répétés.

En ce qui concerne les sauts isolés, les résultats ont été entièrement en accord avec la littérature revue, c'est-à-dire, aucune différence significative n'a été trouvée dans la F, V et P entre les conditions de N, MH et SH. Cela met en évidence qu'en conditions normobarique, l'hypoxie aiguë n'impacte pas les actions isolées brèves et explosives, comme le saut de CMJ. De plus, comme les niveaux d'hypoxémie ont été significativement différents entre les conditions, cela met encore plus en évidence le fait qu'en NH, ce n'est pas le manque de disponibilité d' O_2 qui impacte les actions isolées, brèves et explosives.

En ce qui concerne les sauts répétés de CMJ, les différentes conditions d'altitude n'impactent pas l'IF sans charges ni avec une charge de 30% BW. De plus, dans le même sens, les puissances moyenne et maximale atteintes dans toutes les conditions ne sont pas significativement différentes. Au contraire de ce qui avait été postulé, les conditions d'altitude n'étaient pas en mesure de créer un manque d' O_2 au niveau central conséquent pour provoquer une moindre activation des motoneurons par la commande centrale. Probablement, des altitudes plus hautes peuvent provoquer des effets sur la fatigue du système nerveux central. Enfin, l'exposition aiguë normobarique à MH et SH n'impacte pas négativement la capacité de produire une puissance anaérobie pendant un exercice de sauts répétés à 1 minute.

La charge à 30% BW a eu un impact sur plusieurs variables, ce qui renforce l'idée de l'impact de la charge sur les conditions, notamment sur SH. Seulement dans la condition SH, l'IF est significativement plus grand à 30% BW que sans charges. Dans la même mesure, pour des niveaux d'hypoxémie significativement différents pour toutes les conditions, le RPE a été significativement différent entre SH et N seulement avec une charge de 30% BW. Finalement, la lactatémie était significativement différente à 30% BW entre SH et N/MH. Tous ces indicateurs vont dans le sens qu'une charge de 30% BW associée à l'hypoxie peut induire un stress métabolique plus conséquent lors d'un entraînement contre-résistance.

6. Références

1. Abe, T., Hinata, S., Koizumi, K., & Sato, Y. (2005). Day-to-day change in muscle strength and MRI-measured skeletal muscle size during 7 days KAATSU resistance training : A case study. *International Journal of KAATSU Training Research*, 1(2), 71-76.
2. Adams, K., O'Shea, J. P., O'Shea, K. L., & Climstein, M. (1992). The effect of six weeks of squat, plyometric and squat-plyometric training on power production. *Journal of applied sport science research*, 6(1), 36-41.
3. Álvarez-Herms, J., Julià-Sánchez, S., Gatterer, H., Viscor, G., & Burtscher, M. (2015). Differing levels of acute hypoxia do not influence maximal anaerobic power capacity. *Wilderness & environmental medicine*, 26(1), 78-82.
4. Amann, M., & Calbet, J. A. (2008). Convective oxygen transport and fatigue. *Journal of applied physiology*, 104(3), 861-870.
5. Amann, M., & Dempsey, J. A. (2008). Locomotor muscle fatigue modifies central motor drive in healthy humans and imposes a limitation to exercise performance. *The Journal of physiology*, 586(1), 161-173.
6. Amann, M., & Kayser, B. (2009). Nervous system function during exercise in hypoxia. *High Altitude Medicine & Biology*, 10(2), 149-164.
7. Amann, M., Eldridge, M. W., Lovering, A. T., Stickland, M. K., Pegelow, D. F., & Dempsey, J. A. (2006). Arterial oxygenation influences central motor output and exercise performance via effects on peripheral locomotor muscle fatigue in humans. *The Journal of physiology*, 575(3), 937-952.
8. Amann, M., Romer, L. M., Subudhi, A. W., Pegelow, D. F., & Dempsey, J. A. (2007). Severity of arterial hypoxaemia affects the relative contributions of peripheral muscle fatigue to exercise performance in healthy humans. *The Journal of physiology*, 581(1), 389-403.
9. Baker, D., and S. Nance. The relation between running speed and measures of strength and power in professional rugby league players. *J. Strength Cond. Res.* 13:230 –235, 1999. (Référence indirecte)
10. Billaut, F., Gore, C. J., & Aughey, R. J. (2012). Enhancing team-sport athlete performance. *Sports medicine*, 42(9), 751-767.

11. Bonetti, D. L., Hopkins, W. G., & Kilding, A. E. (2006). High-intensity kayak performance after adaptation to intermittent hypoxia. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 1(3), 246-260.
12. Borg, G. A. (1982). Psychophysical bases of perceived exertion. *Med sci sports exerc*, 14(5), 377-381.
13. Bosco, C., and P. V. Komi. Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching. *Acta Physiol. Scand.* 26:47–67, 1979. (Référence indirecte)
14. Cabanac, M. (1975). Temperature regulation. *Annual Review of Physiology*, 37(1), 415-439.
15. Calbet, J. A., De Paz, J. A., Garatachea, N., De Vaca, S. C., & Chavarren, J. (2003). Anaerobic energy provision does not limit Wingate exercise performance in endurance-trained cyclists. *Journal of Applied Physiology*, 94(2), 668-676.
16. Casartelli, N., Müller, R., & Maffiuletti, N. A. (2010). Validity and reliability of the Myotest accelerometric system for the assessment of vertical jump height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 24(11), 3186-3193.
17. Chapman, R. F., Karlsen, T., Resaland, G. K., Ge, R. L., Harber, M. P., Witkowski, S., ... & Levine, B. D. (2014). Defining the “dose” of altitude training : how high to live for optimal sea level performance enhancement. *Journal of applied physiology*, 116(6), 595-603.
18. Chiroso, I., Feriche, B., Calderón, C., Martínez, M., Braga, R., & Padial, P. (2006). La exposición súbita a una altitud moderada mejora la potencia pico desarrollada por los músculos de las piernas durante un ejercicio de sentadilla. *Arch Med Dep*, 23, 101-108.
19. Cormie, P., McGuigan, M. R., & Newton, R. U. (2011). Developing maximal neuromuscular power. *Sports medicine*, 41(1), 17-38.
20. Costill, D. L., & Hargreaves, M. (1992). Carbohydrate nutrition and fatigue. *Sports medicine*, 13(2), 86-92.
21. Delliaux, S., & Jammes, Y. (2006). Effects of hypoxia on muscle response to tendon vibration in humans. *Muscle & nerve*, 34(6), 754-761.
22. Di Prampero, P. E. (2003). Factors limiting maximal performance in humans. *European journal of applied physiology*, 90(3-4), 420-429.
23. Driss, T., Driss, T., Vandewalle, H., Quièvre, J., Miller, C., & Monod, H. (2001). Effects of external loading on power output in a squat jump on a force platform : a comparison

- between strength and power athletes and sedentary individuals. *Journal of Sports Sciences*, 19(2), 99-105.
24. Edwards, A. M., & Polman, R. C. J. (2013). Pacing and awareness : brain regulation of physical activity. *Sports Medicine*, 43(11), 1057-1064.
 25. Faccioni, A. (1994). Assisted and resisted methods for speed development : Part 2. *Modern Athlete and Coach*, 32(2), 3-6.
 26. Feriche, B., García-Ramos, A., Calderón-Soto, C., Drobnic, F., Bonitch-Góngora, J. G., Galilea, P. A., ... & Padial, P. (2014). Effect of acute exposure to moderate altitude on muscle power : hypobaric hypoxia vs. normobaric hypoxia. *PLoS One*, 9(12), e114072.
 27. Feriche, B., García-Ramos, A., Morales-Artacho, A. J., & Padial, P. (2017). Resistance Training Using Different Hypoxic Training Strategies: a Basis for Hypertrophy and Muscle Power Development. *Sports Medicine-Open*, 3(1), 12.
 28. Ferretti, G., Hauser, H. A., & di Prampero, P. E. (1990). VII. Maximal muscular power before and after exposure to chronic hypoxia. *International journal of sports medicine*, 11(S 1), S31-S34.
 29. Finer, J. T., Simmons, R. M., & Spudich, J. A. (1994). Single myosin molecule mechanics: piconewton forces and nanometre steps. *Nature*, 368(6467), 113-119.
 30. Fiori G, Facchini F, Ismagulov O, Ismagulova A, Tarazona-Santos E, et al. (2000) Lung volume, chest size, and hematological variation in low-, medium-, and high-altitude central Asian populations. *Am J Phys Anthropol* 113: 47–59. (Référence indirecte)
 31. Fitzsimons, M, Dawson, B, Ware, D, and Wilkinson, A. Cycling and running tests of repeated sprint ability. *Aust J Sci Med Sport* 25 : 82–87, 1993. (Référence indirecte)
 32. Fowler NE, Lees A, and Reilly T. Spinal shrinkage in unloaded and loaded drop-jumping. *Ergonomics* 37 : 133-139, 1994. (Référence indirecte)
 33. Friedmann, B., Kinscherf, R., Borisch, S., Richter, G., Bärtsch, P., & Billeter, R. (2003). Effects of low-resistance/high-repetition strength training in hypoxia on muscle structure and gene expression. *Pflügers Archiv*, 446(6), 742-751.
 34. García-Ramos, A., Argüelles, J., de la Fuente, B., Padial, P., Bonitch, J., Calderón, C., ... & Feriche, B. (2014). Performance of muscular power profile after a training camp at moderate natural altitude in young swimmers. *J Strength Cond Res*, 28, 85.
 35. García-Ramos, A., Padial, P., De la Fuente, B., Argüelles-Cienfuegos, J., Bonitch-Góngora, J., & Feriche, B. (2017). The Effect of Acute and Chronic Exposure to Hypobaric Hypoxia on Loaded Squat Jump Performance. *Journal of human kinetics*, 56(1), 149-158.

36. García-Ramos, A., Štirn, I., Padial, P., Argüelles-Cienfuegos, J., De la Fuente, B., Strojnik, V., & Ferlic, B. (2016). The maximal mechanical capabilities of leg extensors muscles to generate velocity and power improve at altitude. *J Strength Cond Res*.
37. Garhammer, J., & Gregor, R. (1992). Propulsion forces as a function of intensity for weightlifting and vertical jumping. *J Appl Sport Sci Res*, 6(3), 129-34.
38. Gauchard, G. C., Gangloff, P., Vouriot, A., Mallie, J. P., & Perrin, P. P. (2002). Effects of exercise-induced fatigue with and without hydration on static postural control in adult human subjects. *International Journal of Neuroscience*, 112(10), 1191-1206.
39. Girard, O., Amann, M., Aughey, R., Billaut, F., Bishop, D. J., Bourdon, P., ... & Gore, C. J. (2013). Position statement—altitude training for improving team-sport players' performance : current knowledge and unresolved issues. *Br J Sports Med*, 47 (Suppl 1), i8-i16.
40. Girard, O., Brocherie, F., & Millet, G. P. (2017). Effects of Altitude/Hypoxia on Single- and Multiple-Sprint Performance : A Comprehensive Review. *Sports Medicine*, 1-19.
41. Glaister, M., Howatson, G., Pattison, J. R., & McInnes, G. (2008). The reliability and validity of fatigue measures during multiple-sprint work: an issue revisited. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 22(5), 1597-1601.
42. Gulch, R. W. Force-velocity relations in human skeletal muscle. *Int. J. Sports Med.* 15(Suppl.) : S2–S10, 1994. (Référence indirecte)
43. Haakinen, H., Komi, P.V (1985). Changes in electrical and mechanical behavior of leg extensor muscles during heavy resistance strength training. *Scand. J. Sports Sci.* 7(2), 55-64.
44. Hahn, A. G., & Gore, C. J. (2001). The effect of altitude on cycling performance. *Sports Medicine*, 31(7), 533-557.
45. Hamlin, M. J., Hopkins, W. G., & Hollings, S. C. (2015). Effects of altitude on performance of elite track-and-field athletes. *International journal of sports physiology and performance*, 10(7), 881-887. (Référence indirecte)
46. Harris, G. R., Stone, M. H., O'bryant, H. S., Proulx, C. M., & Johnson, R. L. (2000). Short-Term Performance Effects of High Power, High Force, or Combined Weight-Training Methods. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 14(1), 14-20.
47. Harris, K. B. H., Foster, C., De Koning, J. J., Dodge, C., Wright, G. A., & Porcari, J. P. (2013). Rapidity of response to hypoxic conditions during exercise. *International journal of sports physiology and performance*, 8(3), 330-335.

48. Henneman, E., Somjen, G., & Carpenter, D. O. (1965). Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J neurophysiol*, 28(3), 560-580.
49. Ho, J. Y., Kuo, T. Y., Liu, K. L., Dong, X. Y., & Tung, K. (2014). Combining normobaric hypoxia with short-term resistance training has no additive beneficial effect on muscular performance and body composition. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 28(4), 935-941.
50. Hoffman, J. R., Kraemer, W. J., Fry, A. C., Deschenes, M., & Kemp, M. (1990). The Effects of Self-selection for Frequency of Training in a Winter Conditioning Program for Football. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 4(3), 76-82.
51. Hrysomallis, C. (2012). The effectiveness of resisted movement training on sprinting and jumping performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 26(1), 299-306.
52. Inness, M. W., Billaut, F., Walker, E. J., Petersen, A. C., Sweeting, A. J., & Aughey, R. J. (2016). Heavy resistance training in hypoxia enhances 1RM squat performance. *Frontiers in physiology*, 7.
53. Janssen, I., Sheppard, J. M., Dingley, A. A., Chapman, D. W., & Spratford, W. (2012). Lower extremity kinematics and kinetics when landing from unloaded and loaded jumps. *Journal of applied biomechanics*, 28(6), 687-693.
54. Janssen, I., Sheppard, J. M., Dingley, A. A., Chapman, D. W., & Spratford, W. (2012). Lower extremity kinematics and kinetics when landing from unloaded and loaded jumps. *Journal of applied biomechanics*, 28(6), 687-693.
55. Kaneko, M., T. Fuchimoto, H. Toji, and K. Suei. Training effect of different loads on the force-velocity relationship and mechanical power output in human muscle. *Scand. J. Sports Sci.* 5:50–55, 1983. (Référence indirecte)
56. Knapik, J. J., R. H. Mawdsley, and M. U. Ramos. Angular specificity and test mode specificity of isometric and isokinetic strength training. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* 5:58– 65, 1983. (Référence indirecte)
57. Kon, M., Ohiwa, N., Honda, A., Matsubayashi, T., Ikeda, T., Akimoto, T., ... & Russell, A. P. (2014). Effects of systemic hypoxia on human muscular adaptations to resistance exercise training. *Physiological reports*, 2(6), e12033.
58. KraemeR, W. J. A series of studies—the physiological basis for strength training in American football : fact over philosophy. *J. Strength Cond. Res.* 11 : 131–142, 1997. (Référence indirecte)

59. Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Medicine and science in sports and exercise*, 36(4), 674-688.
60. Kraemer, W. J., Adams, K., Cafarelli, E., Dudley, G. A., Dooly, C., Feigenbaum, M. S., ... & Newton, R. U. (2002). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine and science in sports and exercise*, 34(2), 364-380.
61. Kurobe, K., Huang, Z., Nishiwaki, M., Yamamoto, M., Kanehisa, H., & Ogita, F. (2015). Effects of resistance training under hypoxic conditions on muscle hypertrophy and strength. *Clinical physiology and functional imaging*, 35(3), 197-202.
62. Levine, B. D., Stray-Gundersen, J., & Mehta, R. D. (2008). Effect of altitude on football performance. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 18(s1), 76-84.
63. Loenneke, J. P., & Pujol, T. J. (2009). The use of occlusion training to produce muscle hypertrophy. *Strength & Conditioning Journal*, 31(3), 77-84.
64. Macadam, P. (2016). *The effects of different wearable resistance loads and placements during vertical jumping and sprint running* (Doctoral dissertation, Auckland University of Technology).
65. Manimmanakorn, A., Manimmanakorn, N., Taylor, R., Draper, N., Billaut, F., Shearman, J. P., & Hamlin, M. J. (2013). Effects of resistance training combined with vascular occlusion or hypoxia on neuromuscular function in athletes. *European journal of applied physiology*, 113(7), 1767-1774.
66. Markovic, G., & Jaric, S. (2007). Is vertical jump height a body size-independent measure of muscle power? *Journal of sports sciences*, 25(12), 1355-1363.
67. Markovic, S., Mirkov, D. M., Knezevic, O. M., & Jaric, S. (2013). Jump training with different loads: effects on jumping performance and power output. *European journal of applied physiology*, 113(10), 2511-2521.
68. Mauch, M., Rist, H. J., & Kaelin, X. (2017). Reliability and Validity of Two Measurement Systems in the Quantification of Jump Performance. *Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin & Sporttraumatologie*, 65(1).
69. McGuigan, M.R., G.A. Wright, and S.J. Fleck, Strength training for athletes: does it really help sports performance? *Int J Sports Physiol Perform*, 2012. 7(1) : p. 2-5.
70. McLean, B. D., Buttifant, D., Gore, C. J., White, K., Liess, C., & Kemp, J. (2013). Physiological and performance responses to a preseason altitude-training camp in elite

- team-sport athletes. *International journal of sports physiology and performance*, 8(4), 391-399.
71. McLellan, C. P., Lovell, D. I., & Gass, G. C. (2011). The role of rate of force development on vertical jump performance. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(2), 379-385.
 72. Melissa L, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Cipriano N, Green HJ. Skeletal muscle adaptations to training under normobaric hypoxic versus normoxic conditions. *Med Sci Sports Exerc.* 1997 ;29:238–43. (Référence indirecte)
 73. Mercadé, J. J., Arellano, R., & Feriche, B. (2006). Effects of acute moderate altitude exposure on physiological and technical performance in front crawl swimming. In 2006) *Proceedings of the 10th International Symposium on Biomechanics and Medicine in Swimming. Porto, Portugal* (pp. 148-150).
 74. Mercadé JJ, Morales E, Argüelles J, Domínguez R, De la Fuente B et al. (2013) Effects of acute moderate hypoxia on performance and biomechanical parameters in 50-m front crawl in elite swimmers. In Balagué N, Torrents C, Vilanova A, Cadefau J, Tarragó R., Tsolakidis E, editors. *Proceedings of the 18th annual Congress of the ECSS. National Institute of Physical Education of Catalonia.* pp. 817. (Référence indirecte)
 75. Millet, G. P., Faiss, R., & Pialoux, V. (2012). Point: Counterpoint: Hypobaric hypoxia induces/does not induce different responses from normobaric hypoxia. *Journal of Applied Physiology*, 112(10), 1783-1784.
 76. Millet, G. Y., Aubert, D., Favier, F. B., Busso, T., & Benoit, H. (2009). Effect of acute hypoxia on central fatigue during repeated isometric leg contractions. *Scandinavian journal of medicine & science in sports*, 19(5), 695-702.
 77. Morin, J. B., Edouard, P., & Samozino, P. (2011). Technical ability of force application as a determinant factor of sprint performance. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(9), 1680-1688.
 78. Newton, R. U., Kraemer, W. J., & Haekkinen, K. E. I. J. O. (1999). Effects of ballistic training on preseason preparation of elite volleyball players. *Medicine and science in sports and exercise*, 31, 323-330.
 79. Nishimura, A., Sugita, M., Kato, K., Fukuda, A., Sudo, A., & Uchida, A. (2010). Hypoxia increases muscle hypertrophy induced by resistance training. *International journal of sports physiology and performance*, 5(4), 497-508.
 80. Noakes, T. D. (1998). Maximal oxygen uptake: " classical" versus " contemporary" viewpoints: a rebuttal. *Medicine and science in sports and exercise*, 30(9), 1381-1398.

81. Noakes, T. D., Peltonen, J. E., & Rusko, H. K. (2001). Evidence that a central governor regulates exercise performance during acute hypoxia and hyperoxia. *Journal of Experimental Biology*, 204(18), 3225-3234.
82. Nuzzo, J. L., Anning, J. H., & Scharfenberg, J. M. (2011). The reliability of three devices used for measuring vertical jump height. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 25(9), 2580-2590.
83. Peronnet, F. R. A. N. C. O. I. S., Thibault, G., & Cousineau, D. L. (1991). A theoretical analysis of the effect of altitude on running performance. *Journal of Applied Physiology*, 70(1), 399-404.
84. Pope, Z. K., Willardson, J. M., & Schoenfeld, B. J. (2013). Exercise and blood flow restriction. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 27(10), 2914-2926.
85. Raguso CA, Guinot SL, Janssens JP, Kayser B, Pichard C (2004) Chronic hypoxia: common traits between chronic obstructive pulmonary disease and altitude. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care* 7: 411– 417. (Référence indirecte)
86. Rasmussen, P., Dawson, E. A., Nybo, L., Van Lieshout, J. J., Secher, N. H., & Gjedde, A. (2007). Capillary-oxygenation-level-dependent near-infrared spectrometry in frontal lobe of humans. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 27(5), 1082-1093.
87. Sale, D. G. Neural adaptations to strength training. In: *Strength and Power in Sport*, P. V. Komi (Ed.). Oxford : Blackwell Scientific Publications, 1992, pp. 249–265. (Référence indirecte)
88. Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A., & Morin, J. B. (2012). Optimal Force–Velocity Profile in Ballistic Movements—Altius. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(2), 313-322.
89. Sargeant, A. J. (1994). Human power output and muscle fatigue. *International journal of sports medicine*, 15(03), 116-121.
90. Schoenfeld, B. J. (2013). Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports medicine*, 43(3), 179-194.
91. Scott, B. R., Slattery, K. M., & Dascombe, B. J. (2014). Intermittent hypoxic resistance training : does it provide added benefit?. *Frontiers in physiology*, 5.
92. Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V., Hodson, J. A., & Dascombe, B. J. (2015). Physical performance during high-intensity resistance exercise in normoxic and hypoxic conditions. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 29(3), 807-815.
93. Smith, K. J., & Billaut, F. (2010). Influence of cerebral and muscle oxygenation on repeated-sprint ability. *European journal of applied physiology*, 109(5), 989-999.

94. Strojnik, V., & Komi, P. V. (1998). Neuromuscular fatigue after maximal stretch-shortening cycle exercise. *Journal of Applied Physiology*, 84(1), 344-350.
95. Subudhi, A. W., Dimmen, A. C., & Roach, R. C. (2007). Effects of acute hypoxia on cerebral and muscle oxygenation during incremental exercise. *Journal of Applied Physiology*, 103(1), 177-183.
96. Sumide, T., Sakuraba, K., Sawaki, K., Ohmura, H., & Tamura, Y. (2009). Effect of resistance exercise training combined with relatively low vascular occlusion. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(1), 107-112.
97. Takarada, Y., Sato, Y., & Ishii, N. (2002). Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes. *European journal of applied physiology*, 86(4), 308-314.
98. Takarada, Y., Takazawa, H., Sato, Y., Takebayashi, S., Tanaka, Y., & Ishii, N. (2000). Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *Journal of applied physiology*, 88(6), 2097-2106.
99. Tomazin K, García-Ramos A, Feriche B, Strojnik V, Stirn I. Acute exposure to moderate altitude increased spinal excitability. 21st Annual Congress of European College of Sport Science. 2016. (Référence Indirecte)
100. Wehrin, J. P., & Hallén, J. (2006). Linear decrease in $\dot{V}_{O_2 \max}$ and performance with increasing altitude in endurance athletes. *European journal of applied physiology*, 96(4), 404-412.
101. Wilson, G. J., Newton, R. U., Murphy, A. J., & Humphries, B. J. (1993). The optimal training load for the development of dynamic athletic performance. *Medicine and science in sports and exercise*, 25(11), 1279-1286.
102. Young, W. (1993). Resistance Training: Training for Speed/Strength : Heavy vs. Light Loads. *Strength & Conditioning Journal*, 15(5), 34-43.
103. Young, W., A. Jenner, and K. Griffiths. Acute enhancement of power performance from heavy squat loads. *J. Strength Cond. Res.* 12 : 82–84, 1998. (Référence indirecte)

7. Annexes

7.1. Formulaire de l'étude



Mémoire « *Repeated jumps in Hypoxia* »

UNIL – avril 2017

Formulaire de l'étude « Répétition des sauts en Hypoxie »

Cher participant,

L'étude scientifique dans laquelle vous participez a comme objectifs: a) établir le profil force vitesse du saut vertical ; b) analyser la fatigabilité sur les sauts verticaux répétés. Elle s'insère dans le comité d'Ethique de la chercheuse Sarah Willis.

Participation :

Votre présence est nécessaire 3 fois dans Centre Sport Santé à l'UNIL ;

Toutes les séances se feront dans la chambre hypoxique ;

Vous irez suivre toujours le même protocole mais à des altitudes différentes, 0, 2000 et 3800 mètres ;

Vous devrez performer le protocole en développant toujours votre maximum à chaque saut ;

Protocole :

- a) Echauffement : 10 minutes de vélo statique en intensité croissante jusqu'à 70% de la FC maximal estimée, suivi de 5 minutes de mobilité et stretching dynamique et une série de 6 CMJ puis 3 minutes de récupération ;
- b) 1 saut de contre mouvement (CMJ) puis 3 minutes de récupération ;
- c) 1 saut CMJ avec barre à 20% de la masse corporel puis 3 minutes de récupération ;
- d) 1 saut CMJ avec barre à 40% de la masse corporel puis 3 minutes de récupération ;
- e) 1 saut CMJ avec barre à 60% de la masse corporel puis 3 minutes de récupération ;
- f) 1 saut CMJ avec barre à 80% de la masse corporel puis 3 minutes de récupération ;
- g) 20 sauts CMJ pendant 1 minute sans charge puis 20 minutes de récupération ;
- h) 20 sauts CMJ pendant 1 minute avec gilet lesté à 30% de la masse corporelle.

L'exécution technique du CMJ:

En partant d'une position de debout avec les mains sur les crists iliaques, le sujet réalise une flexion des genoux jusqu'à 90 degrés et sans s'arrêter saute vers le haut le maximum possible en réceptionnant le sol avec les jambes tendues. Avec la barre, le sujet doit la prendre sur les épaules et exécuter le même saut en ayant toujours la barre sur les épaules. Le sujet doit essayer de sauter toujours le plus droit possible (vertical).

Mesures :

Les participants doivent porter quelques instruments pour la collecte des données :

1. Le Myotest que va être placé à l'hauteur des crists iliaques pendant le test;
2. Le saturomètre que va être placé au doigt après chaque saut.

A part cela seront encore mesurés :

1. La concentration de lactate (4 fois);
2. L'effort ressenti (RPE).

Autres considérations :

- I. Vous êtes libres de mettre terme à la participation de l'étude ;
- II. Les données récoltées seront traitées avec toute la **confidentialité** ;
- III. Les modifications de l'étude susceptibles de modifier la nature du votre consentement seront informées.
- IV. Nous sommes toujours disponibles pour répondre à vos questions.

Pedro Leal

Contacts : 0767922539/ pedrofilipe.botavasquesleal@unil.ch

7.2 Consentement de participation



Mémoire « *Repeated jumps in Hypoxia* »

UNIL – mai 2017

Consentement libre et éclairé

Je, _____ (nom en caractères d'imprimerie), déclare avoir lu et/ou compris le présent formulaire (formulaire de l'étude « Répétition des sauts en hypoxie ») et j'en ai reçu un exemplaire. Je comprends la nature et le motif de ma participation au projet. J'ai eu l'occasion de poser des questions auxquelles on a répondu, à ma satisfaction.

Par la présente, j'accepte librement de participer au projet.

Signature du participant : _____

Fait à _____ le _____ 2017|

7.3 Affiche de recrutement

Viens participer à une étude innovante !

OBJECTIF :

- Etablir ton profil force vitesse pour le saut ;
- Vérifier ta fatigabilité en sauts répétés.

**SEULEMENT 3 SÉANCES
DE 40 MINUTES CHACUNE
DANS LA CHAMBRE HYPOXIQUE**



Contacts : 0767922539/ pedrofilipe.botavasquesleal@unil.ch (Pedro Leal)

7.4 Présentation du projet au responsable



Mémoire « Repeated jumps in Hypoxia »

UNIL – mars 2017

Monsieur l'entraîneur de l'équipe de ...

Je m'appelle Pedro Leal et je suis en train de faire le travail de mémoire du master en entraînement et performance, chez l'UNIL. En ce moment je suis en recherche des participants pour cette investigation. Il s'agit d'un travail que pourra intéresser à toutes les équipes de sports collectifs, surtout aux équipes de volleyball et basketball. On va s'intéresser au saut vertical.

Objectifs :

Établir le profil force/vitesse du saut de chaque joueur : avec ces données vous pourriez savoir si un joueur donné a besoin de s'entraîner plus en force ou plus en vitesse pour atteindre tout son potentiel de saut.

Vérifier les différences du profil force/vitesse et de la fatigabilité selon différents altitudes données (utilisation de la chambre hypoxique) : dans ce point vous pourriez savoir le degré de fatigabilité de vos joueurs.

Plan d'action :

- La présence de chaque joueur est demandée seulement 3 fois au labo.
- Chaque séance aura une durée de +/- 40 minutes (10 minutes d'échauffement + 5 sauts isolées + 2 séries de 20 sauts en 1 minute + temps de récupération entre les séries).
- La collecté des données sera faite entre le 9 avril et le 26 mai.
- Les tests se dérouleront au CSS à l'UNIL : (<http://www2.unil.ch/css/page.php?label=acces>)

Pour faciliter votre travail, vous pouvez, si jamais, m'envoyer les contacts des ceux qui sont intéressés et moi même organise avec eux les séances. A la fin vous allez recevoir un document avec les donnés collectés de chaque joueur.

En attendant votre réponse je vous adresse, Monsieur, mes meilleures salutations.

Pedro Leal

Contacts : 0767922539/ pedrofilipe.botavasquesleal@unil.ch

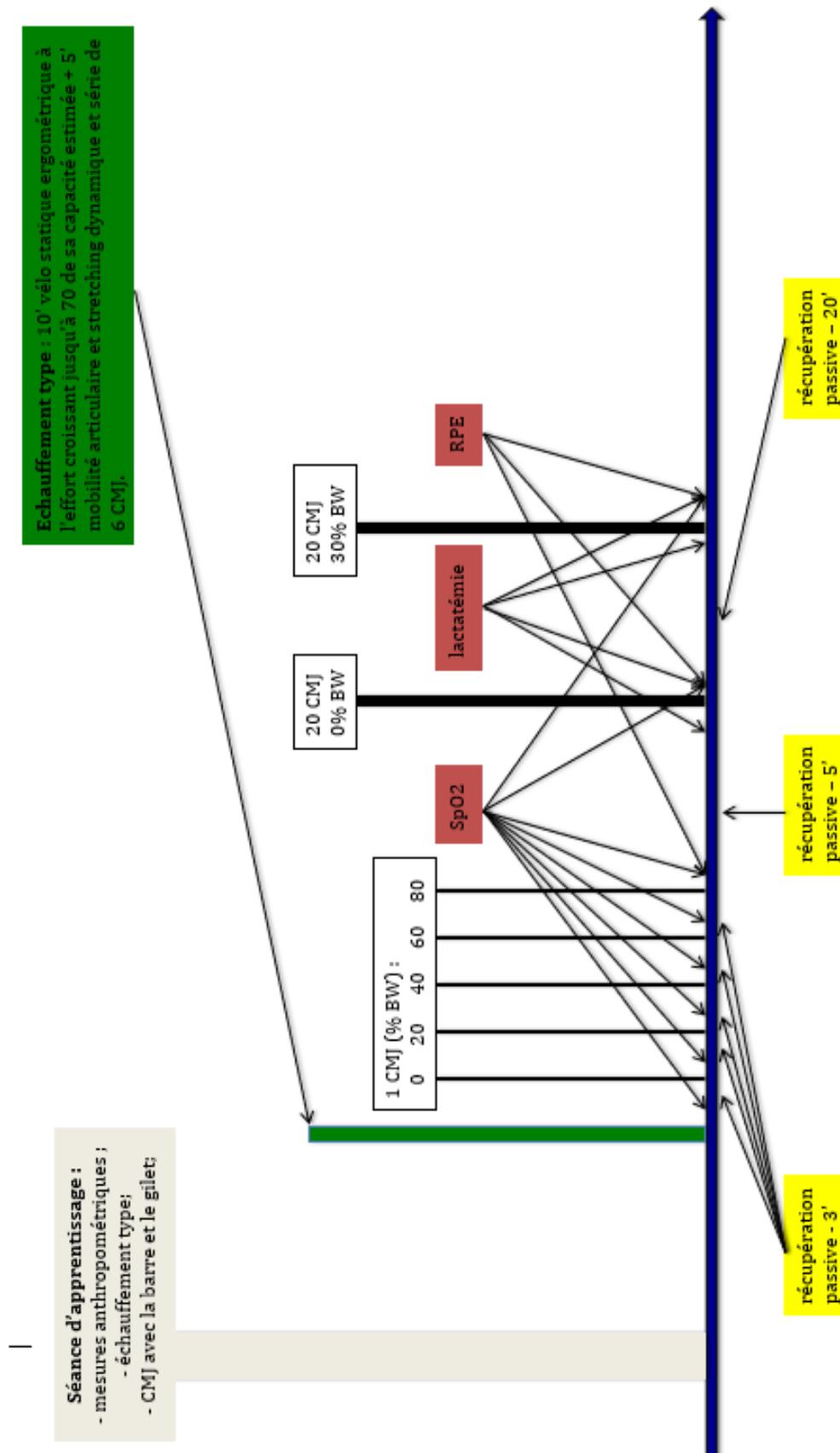
7.5. La planification réelle réalisée

| MAI | <u>lundi</u> | <u>mardi</u> | <u>mercredi</u> | <u>jeudi</u> | <u>vendredi</u> |
|-------------|---|--|--|---|-----------------------------|
| | 1 (N) A1 (11h) | 2 | 3 | 4 (N) A2 (9h) A3 (15h) A4 (17h) A5 (17h30) | 5 |
| | 8 (MH) B1 (10h) A1 (11h) B2 (13h) B3 (17h30) B4 (19h) | 9 | 10 (SH) C1 (16h) C2 (17h30) C3 (18h) | 11 (MH) A2 (9h) A3 (15h) A4 (17h) A5 (17h30) B5 (18h15) | 12 |
| | 15(SH) B1 (10h) A1 (11h) B2 (13h) C4 (14h30) B3 (17h30) B4 (19h) | 16 | 17 (N) C1 (16h) C2 (17h30) C3 (18h) | 18(SH) A2 (9h) A3 (15h) A4 (17h) A5 (17h30) B5 (18h45) | 19 |
| | 22 (N) B1 (10h) B2 (13h) C4 (14h30) B3 (17h30) B4 (19h) | 23 | 24 (MH) C1 (16h) C4 (14h30) C2 (17h30) C3 (18h) | 25 | 26 (N) B5 (18h45) |
| JUIN | 29 | 30 (SH) C5 (18h30) C6 (19h) | 31 | 1 | 2 |
| | 5 (MH) C5 (18h30) C6 (19h) | 6 | 7 | 8 (H) C5 (18h30) C6 (19h) | 9 |

Pour des motifs de confidentialité les noms des sujets ont été échangés par des abréviations. De ce fait, le sujet A1 est le sujet qui a fait le premier passage et qui appartient au groupe A (voir annexe 7.7).

7.6. Le protocole

PROTOCOLE EXPERIMENTAL



7.7. Planification randomisée des tests

La randomisation à trois groupes a été faite avec l'ordre suivante :

| | 1 ^{er} passage | 2 ^{ème} passage | 3 ^{ème} passage |
|----------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Groupe A | N | MH | SH |
| Groupe B | MH | SH | N |
| Groupe C | SH | N | MH |

La planification pour chaque groupe est la suivante :

| | N – 4.05 | MH – 8.05 | SH – 10.05 | MH – 11.05 | SH – 15.05 | N – 17.05 | SH – 18.05 | N – 22.05 | MH – 24.05 |
|----------|-------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
| Groupe A | X | | | X | | | X | | |
| Groupe B | | X | | | X | | | X | |
| Groupe C | | | X | | | X | | | X |