

**Conceptualisation d'un protocole d'entrainement de force
pour les membres inférieurs en hypoxie normobarique ou
sous restriction du flux sanguin pour des patients souffrant de
gonarthrose**

ANTHONY FARDEL

Étudiant HES – Filière Physiothérapie

NATHAN DARBELLAY

Étudiant HES – Filière Physiothérapie

Directeur de travail de Bachelor : ROGER HILFIKER

TRAVAIL DE BACHELOR

Déposé à Loèche-les-Bains (VS-CH) le 5 juin 2020

En vue de l'obtention d'un

Bachelor of sciences HES-SO in Physiotherapy

Résumé

Introduction : L'arthrose est l'atteinte articulaire la plus fréquente chez l'adulte dans le monde. Dans sa phase initiale, le renforcement musculaire est le traitement de choix, car il conduit à une diminution de la symptomatologie, notamment grâce à l'augmentation de la force des muscles péri-articulaires. Cette dernière passe traditionnellement par un entraînement avec des charges lourdes, ce qui ne convient pas aux sujets fragilisés par l'arthrose. Des alternatives avec des charges légères existent, notamment l'entraînement sous restriction du flux sanguin (BFR) ou en hypoxie. Le but de ce travail est de déterminer si un entraînement de force du membre inférieur avec des charges légères, sous BFR ou en hypoxie, est réalisable chez le patient souffrant de gonarthrose.

Méthode : Cette étude a été réalisée en s'appuyant sur l'état actuel de la littérature scientifique, sur les recommandations d'un panel d'experts et sur les observations lors des différentes phases de test en conditions.

Résultats : Un programme d'entraînement du membre inférieur comprenant quatre exercices (squat, pont fessier, fente avant et pas latéral résisté) a été proposé. Diverses modalités BFR et hypoxiques ont également été définies. Enfin, le choix des modalités d'entraînement, telles que la charge, le nombre de répétitions et de séries, les temps de récupération, le temps sous tension et la fréquence ont été spécifiés.

Conclusion : Il semble qu'un entraînement de force en hypoxie ou sous BFR pour une population souffrant de gonarthrose soit réalisable. De futures études devront déterminer si un tel programme permettrait une diminution de la symptomatologie.

Zusammenfassung

Einleitung: Arthrose ist weltweit die häufigste Gelenkerkrankung bei Erwachsenen. In der Anfangsphase ist die optimale Behandlung die Muskelkräftigung, da sie zu einer Verringerung der Symptome führt, insbesondere durch eine Erhöhung der Kraft der periartikulären Muskeln. Letzteres beinhaltet normalerweise ein Training mit zusätzlichem Gewicht, was für Arthrose geschwächte Personen nicht geeignet ist. Eine alternative Trainingsmöglichkeit mit weniger Belastung wäre, beispielsweise ein Training mit eingeschränkter Durchblutung (BFR) oder Hypoxie. Ziel dieser Arbeit ist es, festzustellen, ob ein leichtes, BFR- oder hypoxisches Krafttraining der unteren Extremität bei einem Patienten mit Arthrose durchführbar ist.

Methode: Diese Studie wurde auf der Grundlage des aktuellen Stands der wissenschaftlichen Literatur, der Empfehlungen eines Expertengremiums und der Beobachtungen während verschiedenen Testphasen unter bestimmten Bedingungen durchgeführt.

Ergebnisse: Es wurde ein Trainingsprogramm für die unteren Extremitäten vorgeschlagen, das vier Übungen (squat, bridging, forward lunge und resisted sidestep) umfasste. Es wurden auch verschiedene BFR- und hypoxische Modalitäten definiert. Schließlich wurde die Wahl der Trainingsmodalitäten, wie Belastung, Anzahl der Wiederholungen und Serien, Erholungszeiten, Zeit unter Spannung und Häufigkeit festgelegt.

Schlussfolgerung: Es scheint, dass ein Krafttraining unter Hypoxie oder unter BFR für Personen, die an Gonarthrose leiden, durchführbar ist. Zukünftige Studien werden feststellen müssen, ob ein solches Programm zu einer Verringerung der Symptomatik führen würde.

Remerciements

Nous souhaitons tout d'abord adresser nos plus sincères remerciements à notre directeur de travail de Bachelor, Monsieur Roger Hilfiker. Ses conseils avisés nous auront permis de réaliser ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons également à remercier Monsieur Michael Duc, Monsieur Jonas Denkinger et Monsieur Bertrand Léger pour leur grande disponibilité. Leur expertise aura amené une grande richesse aux différents échanges que nous avons pu avoir. Merci également d'avoir mis les infrastructures nécessaires à la réussite de ce travail à notre disposition.

Enfin, nous tenons également à exprimer notre plus grande reconnaissance à nos proches pour leur inépuisable soutien durant nos études, ainsi que pour le temps alloué à la relecture attentive de ce travail.

Table des matières

Résumé.....	II
Zusammenfassung.....	III
Remerciements.....	IV
Liste des abréviations	VII
<i>Introduction</i>	<i>1</i>
Arthrose	1
Traitements	1
Programme standard de réhabilitation	2
Mécanismes conduisant à une diminution de la douleur par l'exercice physique	2
Conclusion de la problématique de l'arthrose	4
Généralités de l'entraînement de force	4
Restriction du flux sanguin.....	6
Mécanismes d'adaptation	7
Hypoxie	8
Hypothèses	9
<i>Méthode</i>	<i>10</i>
Panel d'experts.....	10
Recherche littéraire.....	11
Différentes phases de test et d'échange avec les experts.....	12
Échange avec le directeur du travail de Bachelor	12
Phase de test en conditions hypoxiques	12
Phase de test sous BFR	13
Échange avec les ExH et ExPT	13
<i>Résultats.....</i>	<i>13</i>
Résultats intermédiaires.....	13
Résultats finaux.....	15
Choix des exercices	15
Modalités BFR	18
Modalités hypoxiques.....	19
Modalités d'entraînement	19
<i>Discussion</i>	<i>20</i>
Choix des exercices.....	21
Squat.....	21
Pont fessier	21
Fente avant	22
Pas latéral résisté	22
Modalités BFR	23
Modalités hypoxiques	23
Modalités d'entraînement	24

Charge	24
Nombre de répétitions et de séries.....	25
Temps de récupération	27
Temps sous tension.....	28
Fréquence	29
<i>Forces et limites</i>	30
<i>Conclusion</i>	30
<i>Bibliographie.....</i>	VIII
<i>Liste des illustrations.....</i>	XXIX
<i>Annexes</i>	XXX
Annexe 1	XXX
Facteurs de risque	XXX
Classification de l'arthrose	XXX
Physiopathologie de l'arthrose	XXX
Annexe 2	XXXIII
Traitement de l'arthrose	XXXIII
Annexe 3	XXXV
Mécanismes conduisant à une diminution de la douleur par l'exercice physique	XXXV
Annexe 4	XL
Mécanisme d'adaptation du BFR	XL
Annexe 5	XLII
Mécanismes d'adaptation en hypoxie.....	XLII
Annexe 6	XLIII
Annexe 7	XLIV
Première phase : test en conditions hypoxiques	XLIV
Deuxième phase : test sous restriction du flux sanguin	XLV
Troisième phase : rencontre avec les experts à la clinique romande de réadaptation	XLVIII
Annexe 8	LI

Liste des abréviations

1-RM	: Une répétition maximale
ACR	: « American College of Rheumatology » ; Collège américain de rhumatologie
BFR	: « Blood flow restriction » ; restriction du flux sanguin
CK	: Créatine kinase
CRR	: Clinique Romande de Réadaptation
EULAR	: « European League Against Rheumatism » ; Ligue européenne contre le rhumatisme
EVA	: Échelle visuelle analogique
ExBFR	: Expert en entraînement de force et en restriction du flux sanguin
ExH	: Expert en entraînement de force et en hypoxie
ExPT	: Expert en physiothérapie
ExRC	: Expert en recherche clinique
FiO ₂	: Fraction inspirée en oxygène
GH	: « Growth hormone » ; hormone de croissance
HST	: « Heel strike transient »
IL-6	: Interleukin6
LI-BFR	: « Low intensity – blood flow restriction » ; entraînement à basse intensité réalisé avec une restriction du flux sanguin
O ₂	: Oxygène
P _i O ₂	: Pression d'oxygène inspirée
PTG	: Prothèse totale de genou
TST	: Temps sous tension
UM	: Unité motrice

Introduction

Arthrose

L'arthrose est une problématique universelle, ainsi qu'un réel problème de santé publique. En effet, elle est l'atteinte articulaire la plus fréquente chez l'adulte dans le monde (Felson, 1988). C'est également une des causes les plus fréquentes de douleur, de perte de fonction et d'incapacité dans la population occidentale. Elle touche la majorité des personnes de 65 ans et pratiquement 80% des personnes âgées de plus de 75 ans. Aux États-Unis, c'est la deuxième cause d'incapacité de travail chez les personnes de plus de 50 ans, après les cardiopathies ischémiques (Arden & Nevitt, 2006). Les facteurs de risque et la physiopathologie de l'arthrose sont récapitulés dans la figure 1. Ils sont cependant plus détaillés en annexe [[Annexe 1](#)].

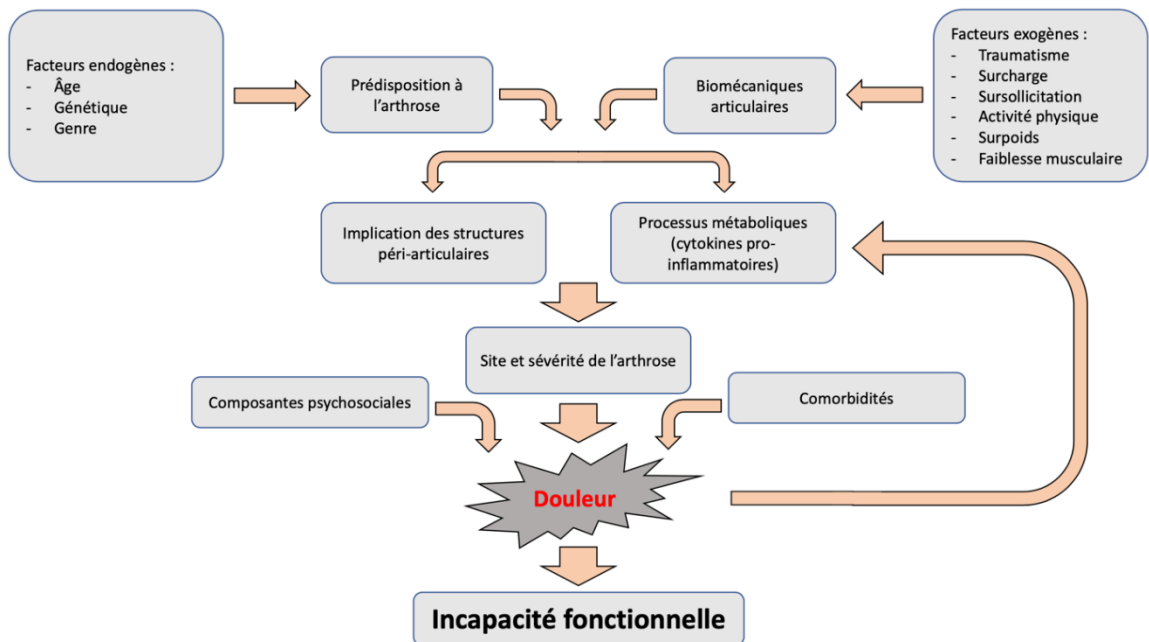


Figure 1 : Récapitulatif de la physiopathologie de l'arthrose, Darbellay & Fardel (2020)

Traitements

En ce qui concerne le traitement de cette pathologie, une multitude de choix est à disposition. Pour commencer, divisons déjà les deux grands axes de traitement. Le traitement de première instance est le traitement conservateur, dont fait partie la physiothérapie. Lorsque ce dernier est inefficace, on opte alors pour le traitement chirurgical. Ces deux traitements sont plus détaillés en annexe [[Annexe 2](#)].

Programme standard de réhabilitation

La physiothérapie est le traitement adéquat dans la phase initiale de cette atteinte musculosquelettique. Elle est d'ailleurs recommandée par la Ligue Européenne contre le Rhumatisme (EULAR) et le Collège Américain de Rhumatologie (ACR) (American College of Rheumatology, 2000; Pendleton, 2000).

La panoplie de choix de traitements physiothérapeutiques à disposition est conséquente (Dadabo et al., 2019; Page et al., 2011; Zhang et al., 2010). Dans ce travail, nous allons nous concentrer exclusivement sur l'exercice physique, considéré comme la pierre angulaire du traitement conservatif (Brosseau et al., 2005 ; Conaghan et al., 2008). En effet, Zhang et al. (2010) ont prouvé que l'exercice a des effets similaires à ceux des analgésiques simples et des anti-inflammatoires non stéroïdiens, mais que, contrairement aux médicaments et à la chirurgie, les contre-indications et les effets indésirables sont bien moins nombreux. De plus, plusieurs études ont démontré que l'exercice physique réduisait la douleur chez des patients souffrant de douleurs chroniques (Bennell et al., 2010; Chang et al., 2005; Cochrane et al., 2005; Hinman et al., 2010; Naugle et al., 2012).

Concernant l'intensité des programmes d'entraînement, il est impossible de déterminer avec certitude si une intensité élevée peut avoir des effets plus nocifs qu'une intensité plus faible (Regnaux et al., 2015). En revanche, pour contrer la sarcopénie, des exercices à basse intensité sont suffisants, mais pour optimiser et maximiser les gains, c'est un entraînement à haute intensité qu'il faut effectuer (D. Beckwée et al., 2019). Quoi qu'il en soit, il semble important de proposer des exercices avec des charges progressives dans le but de laisser un temps d'adaptation à l'organisme (Brosseau et al., 2017; Jan et al., 2009; Jorge et al., 2015; Lin et al., 2009).

Mécanismes conduisant à une diminution de la douleur par l'exercice physique

L'efficacité de l'exercice physique dans la diminution de la douleur et dans l'amélioration fonctionnelle de l'articulation arthrosique est bien connue. Cependant, les mécanismes sous-jacents menant à ces résultats sont encore peu clairs. Beckwée et al. (2013) ont donc décidé d'investiguer ces derniers. Ils ont divisé les effets engendrés par l'exercice en cinq groupes réagissant chacun sur un système particulier : les composantes neuromusculaires, les composantes péri-articulaires, les composantes intra-articulaires, les capacités physiques et la santé générale et, finalement, les composantes psychosociales. De plus, il est primordial de prendre en compte les composantes métaboliques qui agissent principalement sur les cytokines pro-inflammatoires. Nous avons récapitulé tous ces

mécanismes dans la figure 2. Le développement complet de ces six groupes distincts est détaillé en annexe. [[Annexe 3](#)].

Mécanismes conduisant à une diminution de la douleur par l'exercice physique	
Composantes neuromusculaires	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ force de contraction des muscles péri-articulaires <ul style="list-style-type: none"> > ↑ qualité du cartilage > ↑ fonctionnelle > ↑ sensibilité des structures sensori-motrices > ↑ absorption des chocs > Redistribution équitable des forces dans l'articulation > Effet protecteur - ↑ proprioception <ul style="list-style-type: none"> > ↑ stabilité articulaire > ↑ absorption des chocs - ↑ équilibre - ↑ apprentissage moteur - ↓ spasmes musculaires - ↓ pic de charge
Composantes péri-articulaires	<ul style="list-style-type: none"> - Modifications osseuses - Modulation du cartilage - Effets anti-inflammatoires - Activation des voies anaboliques
Composantes intra-articulaires	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ production de synovie <ul style="list-style-type: none"> > Nutrition du cartilage > Lubrification de l'articulation
Capacités physiques et santé générale	<ul style="list-style-type: none"> - Bénéfices au niveau du système cardio-vasculaire - Bénéfices au niveau du diabète - Bénéfices au niveau de l'ostéoporose - ↓ charge pondérale <ul style="list-style-type: none"> > ↓ pic de charge
Composantes psycho-sociales	<ul style="list-style-type: none"> - ↑ bien-être - ↑ qualité de vie - ↑ santé mentale - ↑ auto-efficacité - ↓ symptômes de la dépression - Effet placebo
Composantes métaboliques	<ul style="list-style-type: none"> - ↓ cytokines pro-inflammatoires <ul style="list-style-type: none"> > ↓ catabolisme du tissu articulaire > ↓ dommages inflammatoires > ↓ risque de perte cartilagineuse

Figure 2 : Récapitulatif des mécanismes conduisant à une diminution de la douleur par l'exercice physique, Darbellay & Fardel (2020)

Basés sur ces données, nous pouvons nous rendre compte de l'étendue des bienfaits de l'exercice physique. Celui-ci n'a donc pas seulement un effet mécanique, mais atteint réellement toute la systémique corporelle. Il est possible d'observer des bénéfices au niveau mécanique local, au niveau de la santé générale et même au niveau de la psyché. Nous soulignons donc, encore une fois, l'importance de l'exercice physique chez le patient souffrant d'arthrose et allons, par conséquent, désormais déterminer quelques généralités de l'entraînement de force.

Conclusion de la problématique de l'arthrose

En conclusion, l'arthrose est une pathologie dégénérative et incurable. Par conséquent, l'objectif de traitement est de réduire les symptômes du patient et, si possible, de ralentir la progression du processus pathologique. Mohig (1966) a déclaré : « le meilleur traitement pour l'arthrose de genou est la prévention ». En effet, les traitements conservateurs et chirurgicaux ne guérissent pas l'arthrose. Ce ne sont que des alternatives à une symptomatologie. C'est pourquoi la prévention est le seul traitement valable. Il reste toutefois primordial de traiter ces patients de la meilleure manière possible grâce à des programmes de qualité et validés scientifiquement, comme nous allons pouvoir le voir ci-dessous.

Généralités de l'entraînement de force

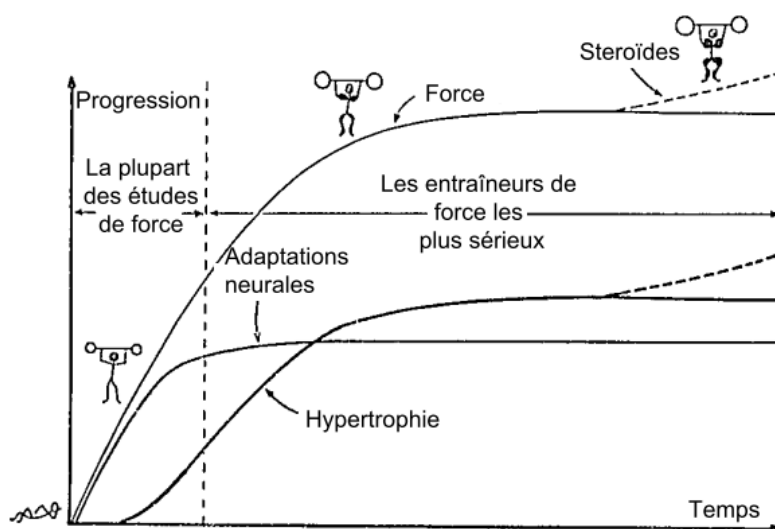


Figure 3 : Rôles relatifs des adaptations neurales et musculaires lors d'un entraînement de force, traduit de Sale (1988)

La capacité à générer de la force est primordiale, quel que soit le mouvement que l'on souhaite réaliser. La force d'un muscle dépend principalement de sa section transverse, ainsi que de l'arrangement des fibres musculaires en son sein (Aagaard et al., 2001). Elle dépend également de facteurs nerveux, notamment le recrutement et la synchronisation des unités motrices (UM) des muscles utilisés (Cometti, 1988). Une augmentation de la section transverse du muscle (McCallet al., 1996 ; Staron et al., 1991), un changement de

sa structure architecturale (Kawakami et al., 1993) ou une amélioration de la fonction nerveuse (Sale, 1988) conduisent donc à une plus grande production de force. Le développement de ces adaptations physiologiques dans le temps est exposée dans la figure 3.

Maintenant que nous en savons plus sur les mécanismes d'adaptation de l'entraînement de force, intéressons-nous plus précisément aux conditions requises pour qu'ils aient lieu. De manière générale, il est convenu qu'une personne doit utiliser des poids correspondant approximativement à 70% de leur répétition maximale (1-RM) au minimum pour bénéficier d'une augmentation de la taille du muscle et de sa force. Une intensité d'exercice inférieure à 70% de 1-RM conduit rarement à ces gains dans des conditions normales (American College of Sports Medicine, 2013).

Pour prescrire des exercices de force, la charge, le nombre de répétitions, le nombre de séries ou encore les temps de récupération sont classiquement utilisés. À ces déterminants traditionnels, Toigo et Boutellier (2006) proposent d'en ajouter d'autres, dans un souci de précision. Ils définissent notamment le temps sous tension (TST) musculaire, l'amplitude de mouvement ou encore la distribution temporelle par mode de contraction. Le TST correspond à la somme des secondes passées sous tension musculaire lors de chaque répétition pour un exercice et ne correspond donc pas forcément au temps d'une répétition multiplié par le nombre de répétitions. Afin d'en avoir une définition temporelle complète, il faut également le répartir dans chaque mode de contraction (concentrique, isométrique et excentrique).

Enfin, bien que les effets positifs de l'entraînement de force avec des charges lourdes ne soient plus à démontrer, il ne convient cependant pas à tout le monde. En effet, le stress mécanique élevé appliqué sur les articulations par les charges lourdes peut ne pas être supporté par certaines populations plus fragiles (personnes âgées, patients en phase de réhabilitation, sujets malades, etc.). Des alternatives avec des charges légères à moyennes permettant à ces populations de tout de même développer leur force musculaire ont donc été investiguées (Feriche et al., 2017; Loenneke et al., 2011b; Manimmanakorn et al., 2013a). On peut notamment citer l'entraînement sous restriction de flux sanguin, ou encore l'entraînement en hypoxie.

Restriction du flux sanguin

L'entraînement de force sous restriction du flux sanguin, également appelé Kaatsu training, a été développé et popularisé par le Dr. Yoshiaki Sato dans le milieu des années 80 au Japon. "Kaatsu" signifie littéralement "pressurisation" en japonais. Cette méthode consiste donc à limiter le retour veineux par occlusion des membres prenant part au mouvement. L'occlusion se faisant à l'aide d'un garrot pneumatique, la pression peut être facilement ajustée afin de maintenir l'arrivée du sang artériel, tout en empêchant le retour veineux.

Réalisée dans les bonnes conditions, cette forme d'entraînement permet des gains d'hypertrophie et de force musculaire, que ce soit chez une population saine (Abe et al., 2006 ; Takarada et al., 2000), clinique (Hughes et al., 2017 ; Ohta et al., 2003) ou âgée (Patterson & Ferguson, 2011 ; Yokokawa et al., 2008). Les recommandations pour une efficacité optimale lors de l'utilisation de la restriction du flux sanguin ont été compilées par Scott et al. (2015).

Cette méthode se révèle donc très intéressante pour une population clinique, incapable de réaliser des exercices avec des charges lourdes, mais pour qui des gains de force seraient souhaitables (Loenneke & Pujol, 2009; Patterson et al., 2019). Devant une population clinique, il faut déterminer à l'avance le type d'exercice pouvant être toléré par les sujets, afin d'avoir une stratégie d'entraînement efficace. Le tableau décisionnel ci-dessous (Figure 4) permet de décider de la meilleure stratégie à adopter (Scott et al., 2015) :

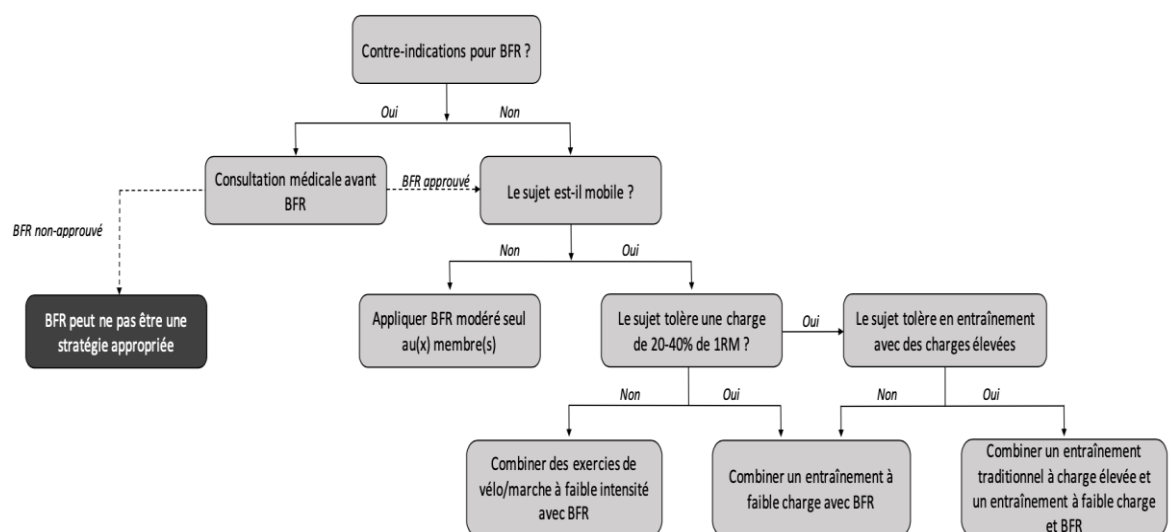


Figure 4 : Tableau décisionnel simplifié sur les stratégies d'utilisation du BFR, traduit de Scott et al. (2015)

Mécanismes d'adaptation

Nombre d'études ont donc démontré les effets bénéfiques de la restriction du flux sanguin sur la force et l'hypertrophie musculaire. Cependant, les mécanismes de réaction et d'adaptation pouvant expliquer ces gains sont encore peu clairs et sont toujours en cours d'investigation. Plusieurs hypothèses pouvant expliquer les gains découlant de l'entraînement sous BFR ont été posées. Celles-ci sont développées en annexe [\[Annexe 4\]](#).

Le mode d'action de l'entraînement à basse intensité sous BFR (LI-BFR) diffère quelque peu de l'entraînement standard en force. Contrairement au schéma traditionnel d'adaptation (Figure 3), les gains de force initiaux induits par l'entraînement LI-BFR seraient dus à l'hypertrophie musculaire, et non aux adaptations neurales (Loenneke et al., 2012). En effet, avec cette méthode, les adaptations neurales n'apparaissent pas dans la première phase de l'entraînement (Figure 5).

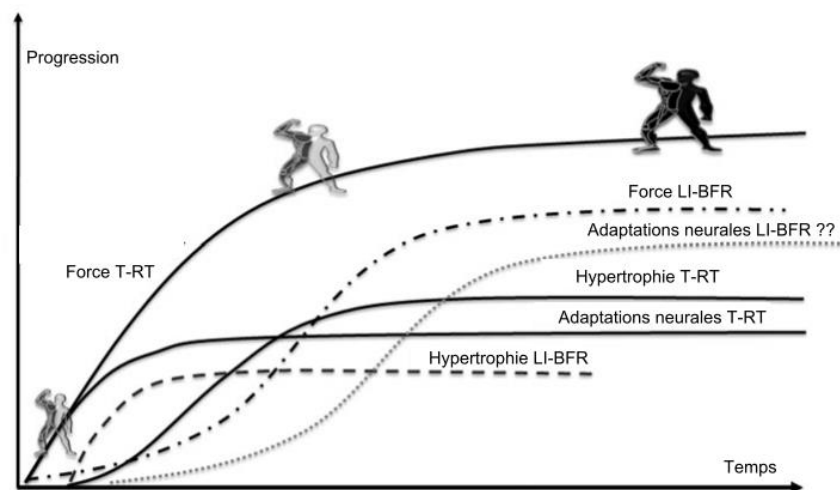


Figure 5 : Interactions théoriques entre la force, l'hypertrophie et les adaptations neurales pour l'entraînement classique vs entraînement sous BFR, traduit de Loenneke et al. (2012)

Enfin, il semblerait que, réalisé dans de bonnes conditions et supervisé par des personnes expérimentées, l'entraînement LI-BFR soit sécuritaire, quel que soit l'âge et les capacités physiques des sujets (Loenneke et al., 2011). Il pourrait en outre remplacer l'entraînement avec des charges lourdes, voir préparer le patient dans le but d'un retour à un entraînement de ce type (Hughes et al., 2017). De plus, l'entraînement LI-BFR se trouve être une méthode de travail sécuritaire, quelle que soit la condition physique du patient (Nakajima et al., 2006). Dans de rares cas, des hématomes sous-cutanés peuvent apparaître à l'emplacement du garrot, mais le risque de thrombose ne semble pas être augmenté avec cette méthode (Manini & Clark, 2009).

Enfin, cette méthode d'entraînement est particulièrement adaptée à une population souffrant de gonarthrose, dont les articulations sont souvent fragilisées et ne permettent pas forcément un entraînement avec de lourdes charges. En plus du fait qu'il soit sécuritaire pour ce type de patient, il n'augmenterait pas les douleurs de genoux ressenties par les patients (Segal et al., 2015a; Segal et al., 2015b). De même, les douleurs perçues durant l'entraînement LI-BFR seraient moindres que celles induites par l'entraînement avec des charges lourdes, pour des gains de force et d'hypertrophie similaires (Bryk et al., 2016; Hollander et al., 2010).

Hypoxie

L'hypoxie signifie littéralement un manque d'oxygène. Elle résulte d'un état où la pression d'oxygène inspirée (P_{iO_2}) est inférieure aux conditions normoxiques, à savoir 150 mmHg. Cette diminution de la P_{iO_2} entraîne une diminution de la pression alvéolaire en oxygène et de la pression artérielle en oxygène. Ce mécanisme a pour conséquence de provoquer une diminution de la saturation artérielle de l'hémoglobine, et donc, de réduire l'approvisionnement d'oxygène (O_2) aux tissus de l'organisme. Le stress hypoxique s'accompagne d'un phénomène d'hyperventilation, ayant pour but de compenser l'apport restreint d'oxygène aux cellules. On retrouve cette condition de manière naturelle en altitude (hypoxie hypobarique), où la pression atmosphérique est diminuée par rapport au niveau de la mer, mais on peut aussi la recréer de manière artificielle, en diminuant la pression d' O_2 dans l'air inspiré (hypoxie normobarique).

L'entraînement en hypoxie a donc été particulièrement investigué pour ses effets sur la performance en endurance. Il l'a cependant été beaucoup moins sur l'impact qu'il aurait sur l'entraînement de force. Certains auteurs ont tout de même observé une hypertrophie musculaire et des gains de force lors d'entraînements en conditions hypoxiques par rapport à un entraînement en normoxie, en utilisant des charges faibles (Manimmanakorn et al., 2013a ; Manimmanakorn et al, 2013b) ou moyennes (Kurobe et al., 2015 ; Nishimura et al., 2010 ; Yan et al., 2016). Cependant, il semblerait ne pas y avoir d'intérêt à ajouter une composante hypoxique à un entraînement avec des charges élevées (Scott et al., 2018b).

Les mécanismes d'adaptation des composantes de force en hypoxie se rapprochent de ceux observés sous BFR. Ils sont développés en annexe [[Annexe 5](#)].

Contrairement aux modalités traditionnelles d'un entraînement de force, certaines études laissent penser qu'un entraînement avec de faibles charges en hypoxie pourrait induire des adaptations hypertrophiques, pour autant qu'un nombre important de répétitions soit réalisé (Manimmanakorn et al., 2013b, 2013a). Dans ce cas, l'hypertrophie est alors induite par des mécanismes métaboliques et non plus mécaniques (Feriche et al., 2017). Dans l'étude de Friedman et al. (2003), avec une charge correspondant à 30% de 1-RM, aucun gain hypertrophique et de force, par rapport à un entraînement en normoxie, n'a été mis en évidence, malgré un nombre important de répétitions effectué. Cependant, les plages allouées à la récupération se déroulaient en normoxie, ce qui diminue considérablement le stimulus hypoxique. De plus, la durée d'intervention ne comprenait que quatre semaines, ce qui pourrait expliquer pourquoi aucune amélioration significative n'a été trouvée. Ces résultats contradictoires suggèrent que l'altitude choisie, ainsi que la durée de récupération permise entre les séries conditionnent les effets d'un entraînement à faible charge combiné à l'hypoxie (Scott et al., 2014a).

Enfin, l'entraînement en hypoxie ne semble pas être plus demandant qu'un entraînement en conditions normales. En effet, plusieurs auteurs sont arrivés à la conclusion que la perception de l'effort était similaire pour un même entraînement réalisé en hypoxie ou en normoxie, tout comme les douleurs musculaires qui en découlent (Feriche et al., 2019; Lockhart et al., 2019; Scott et al., 2018a).

L'entraînement en hypoxie avec des charges légères semble donc adapté. En effet, il permettrait d'augmenter la force des membres inférieurs des patients souffrant de gonarthrose de manière plus efficace, et ainsi de réduire les douleurs liées à l'arthrose. En effet, d'après Millet et al. (2016), réaliser des exercices combinés à un stress hypoxique ralentirait la sarcopénie et augmenterait les capacités physiques et la qualité de vie chez le patient fragile. Il faudrait cependant utiliser un niveau d'hypoxie modéré, compris entre 1800m et 3000m d'altitude, afin de limiter les risques pour la santé des patients.

Hypothèses

Comme expliqué précédemment, nous savons que l'augmentation de la force joue un rôle dans la diminution des douleurs liées à l'arthrose. Nous savons également que l'amélioration de la force dépend directement de l'augmentation de la taille du muscle. Nous nous sommes donc penchés sur l'entraînement en hypoxie et sous restriction du

flux sanguin, sachant que ces méthodes s'étaient révélées efficaces pour augmenter l'hypertrophie d'une patientèle saine.

L'hypothèse suivante a été posée : un entraînement de force du membre inférieur sous restriction du flux sanguin ou en hypoxie normobarique serait réalisable chez un patient souffrant de gonarthrose. Nous avons aussi émis l'hypothèse qu'un tel entraînement amènerait une hypertrophie, des gains et réduirait ainsi la symptomatologie des sujets. Cette seconde hypothèse ne sera malheureusement pas vérifiée avec ce travail.

Méthode

Avant d'entreprendre ce projet, plusieurs questions se sont présentées à nous. Premièrement, nous nous sommes demandé quelles modalités hypoxiques et occlusives choisir pour cet entraînement de force. Puis, nous nous sommes également interrogés sur les exercices à réaliser, ainsi que sur leurs modalités d'exécution. Par cela, nous entendons que nous devons choisir des exercices adaptés, puis définir la charge, le volume, le nombre de répétitions ou encore les temps de récupération entre chaque exercice et chaque série. Enfin, il fallait garder à l'esprit notre population cible, à savoir des patients souffrant d'arthrose. Il fallait donc que toutes ces modalités soient adaptées à leur condition, afin d'avoir un gain de force et d'hypertrophie maximal tout en restant réalisables.

Pour réaliser cette étude, nous nous sommes appuyés sur plusieurs points : l'état actuel de la littérature scientifique sur le sujet, les conseils et recommandations d'un panel d'experts, et enfin, nos observations et celles des experts lors des différentes phases de test en hypoxie ou sous BFR.

Panel d'experts

Dans la réalisation de ce projet, nous nous sommes entourés de quatre experts, ayant tous leurs domaines de prédilection. Nous pouvions compter sur un expert en physiothérapie (ExPT), un expert en entraînement de force et en hypoxie (ExH), un expert en entraînement de force et en restriction de flux sanguin (ExBFR) et un expert en recherche clinique (ExRC). L'ExPT est spécialiste de la problématique de l'arthrose, et présente des caractéristiques pouvant correspondre à notre patientèle cible (âge, douleurs de genou...).

Son ressenti durant les phases de test a donc été indispensable pour pouvoir adapter les modalités de nos exercices. L'ExH est détenteur d'un brevet fédéral d'entraîneur de sport de performance et utilise régulièrement une chambre hypoxique dans le cadre de son travail. Son expertise s'est portée principalement sur les modalités d'entraînement de force et d'hypoxie. L'ExBFR a déjà mené des études et réalisé son travail de mémoire sur la restriction du flux sanguin. Son expertise s'est essentiellement focalisée sur les modalités d'entraînement et d'occlusion sanguine. Dans le cadre de son activité professionnelle, l'ExBFR propose quotidiennement des programmes d'entraînement de force à des patients souffrant d'arthrose. Ses recommandations se sont donc aussi portées sur le dosage adéquat d'un entraînement pouvant convenir aux patients atteints de gonarthrose. Enfin, l'ExRC est biologiste spécialisé en biologie moléculaire. Ses remarques nous ont permis d'établir les possibilités de mesures existantes et réalisables dans le cadre d'une future étude. Sportif récréatif, son ressenti durant les différentes phases de test nous a aussi permis d'équilibrer nos programmes d'entraînement pour qu'ils conviennent aux sujets cibles.

Recherche littéraire

En amont de la conceptualisation de ce protocole d'entraînement de force pour le patient souffrant de gonarthrose, nous avons fait une recherche littéraire sur le sujet, de manière à pouvoir compléter ou confirmer les recommandations des experts. Nous nous sommes d'abord intéressés à la problématique de l'arthrose et aux programmes de renforcement standard visant à diminuer les douleurs qui y sont associées. Puis, nous nous sommes attardés sur les mécanismes conduisant à une diminution de la douleur, sans se focaliser uniquement sur l'amélioration de la force, mais en élargissant le champ de recherche. Nous avons par la suite étudié les méthodes traditionnelles de renforcement musculaire. Enfin, nous nous sommes intéressés à l'entraînement de force en hypoxie normobarique et sous BFR, en nous attardant sur les modalités d'utilisation optimales et les mécanismes d'adaptations musculaires qui y sont associés.

Cependant, bien que nous ayons essayé d'être le plus méthodiques possible, nous n'avons pas documenté notre travail de recherche dès le début. De par l'étendue des domaines traités, il nous aurait été impossible de le faire avec exactitude à posteriori, c'est pourquoi nous avons décidé de ne pas détailler le processus de recherche. Cependant, il est décrit

en annexe la plupart des mots clés que nous avons recherchés sur les différentes bases de données telles que : Pubmed, Cochrane et Google Scholar [[Annexe 6](#)].

Différentes phases de test et d'échange avec les experts

Pour réaliser ce travail, nous nous sommes appuyés sur plusieurs phases de test en conditions hypoxiques ou occlusives, ainsi que sur de nombreux échanges avec les experts. Le processus de développement s'est effectué en plusieurs étapes.

Échange avec le directeur du travail de Bachelor

Dans un premier temps, nous avons pris contact avec notre directeur de travail de Bachelor pour donner une direction à notre projet. Il s'agissait avant tout de déterminer les grandes lignes de notre travail, afin de commencer les recherches théoriques sur les différentes bases de données disponibles.

Phase de test en conditions hypoxiques

Puis, après avoir effectué nos premières recherches, nous avons réalisé une phase de test en conditions hypoxiques (Figure 6). Suite à ces expérimentations, et sur la base des recommandations reçues des experts, nous avons continué notre travail d'élaboration du protocole.



Figure 6 : Première phase de test en conditions hypoxiques, Darbellay & Fardel (2020)

Phase de test sous BFR

Une deuxième phase de test sous BFR a ensuite été effectuée, avec à la clé de nouvelles prises de conscience, ainsi que des échanges enrichissants avec l'ExBFR. En nous concentrant sur ces nouveaux éléments, nous avons poursuivi notre processus d'élaboration.

Échange avec les ExH et ExPT

Finalement, une dernière rencontre avec les experts a été convenue, à laquelle nous sommes arrivés avec de nouvelles propositions. Grâce aux échanges qui ont eu lieu lors de cette rencontre, nous avons pu réorienter nos recherches une dernière fois.

C'est par ces processus réflexifs que nous sommes parvenus à proposer un protocole d'entraînement de force chez le patient souffrant de gonarthrose.

Résultats

Résultats intermédiaires

Dans cette partie est décrit le processus de réflexion ayant amené nos résultats finaux. En effet, nos résultats ont sans cesse évolué grâce aux différentes phases de test que nous avons pu mener, ainsi qu'avec les échanges enrichissants que nous avons pu avoir avec les experts. Ces différentes phases ayant mené à la proposition finale d'un protocole d'entraînement de force pour le patient atteint de gonarthrose sont exposées dans le diagramme ci-dessus (Figure 7). Une version plus détaillée du processus de développement se trouve également en annexe [[Annexe 7](#)].



Figure 7 : Résultats intermédiaires à la suite des diverses rencontres avec les experts, Darbellay & Fardel (2020) ; blood flow restriction (BFR), expert hypoxie (ExH), expert recherche clinique (ExRC), expert physiothérapie (ExPT), expert BFR (ExBFR), modalités non-abordées (/), modalités retenues (✓), questions en suspens (?), modalités abandonnées (x), fréquence cardiaque (FC), saturation pulsée en oxygène (SpO₂), échelle visuelle analogique (EVA), temps sous tension (TST)

Résultats finaux

Les résultats finaux décrits ci-dessous en figure 8 découlent des différentes phases de test, de recherche et de réflexion détaillées précédemment. Ils concernent les exercices choisis pour notre protocole de force, les modalités hypoxiques et BFR proposées, ainsi que les modalités d'entraînement retenues.

						Borg [6-20]	EVA Douleur [0-10]	FC [bpm]	SpO2 [%]
Echauffement sur ergocycle : 5 minutes à 50W, 70-80 rpm									
		Répétitions	Charges/résistances	Récupération [s]	Remarques				
BFR - 50% de la pression occlusive totale OU Hypoxie normobarique - 3000m	Squat	Echec - 2/3	X	60 (Hypoxie) - 90 (BFR)				En continu	En continu
		Echec - 2/3	X	60 (Hypoxie) - 90 (BFR)					
	Pont fessier	Echec - 2/3	X	60 (Hypoxie) - 90 (BFR)					
		Echec - 2/3	X	60 (Hypoxie) - 90 (BFR)					
	Fente avant	Echec - 2/3	X	60 (Hypoxie) - 90 (BFR)	Jambe gauche en avant				
		Echec - 2/3	X	60 (Hypoxie) - 90 (BFR)	Jambre droite en avant				
	Pas latéral	Echec - 2/3	✓	60 (Hypoxie) - 90 (BFR)	1ère rép. à gauche				
Echec - 2/3		✓	60 (Hypoxie) - 90 (BFR)	1ère rép. à droite					

Figure 8 : Protocole d'entraînement de force pour le membre inférieur sous BFR ou en hypoxie normobarique, Darbellay & Fardel (2020)

Choix des exercices

Afin de standardiser la réalisation des exercices entre les différents entraînements et les sujets, chaque mouvement à réaliser a été décrit ci-dessous. Il est important de préciser que les illustrations d'exercices correspondent à un entraînement sous BFR. La réalisation reste cependant identique en conditions hypoxiques.

Squat

Pour prendre la position de référence, le sujet doit placer ses pieds parallèlement et les écarter à la largeur de ses hanches. Ses genoux sont légèrement fléchis, afin de ne pas se trouver en hyperextension. Les hanches sont également légèrement fléchies et le tronc est droit.

Le mouvement s'effectue jusqu'à une flexion de genou de 90°, puis le sujet remonte en s'arrêtant juste avant les 0° d'extension du genou, afin de garder la tension musculaire. Le dos reste droit dans tout le mouvement. Il est autorisé de tendre les bras en avant, afin de maintenir un équilibre stable. Une exécution idéale est démontrée sur la figure 9.

Adaptation : Si l'exercice est trop difficile, il sera réalisé en prenant un appui avec les mains (mur, table, etc.), afin de décharger les membres inférieurs.



Figure 9 : Exécution du squat avec occlusion du membre inférieur, Darbellay & Fardel (2020)

Pont fessier

Le sujet est couché sur le dos. Ses genoux sont fléchis à 90° de flexion. Les pieds sont placés parallèlement. La distance entre les pieds et les genoux correspond à la largeur des hanches. Les mains sont placées sur le ventre.

Le mouvement s'effectue jusqu'à ce que les hanches se trouvent dans la position neutre, soit 0° d'extension. Lorsque le sujet redescend, il est important de ne pas relâcher la contraction. Par conséquent, il ne devra pas reposer le poids de son corps, mais le maintenir en effleurant le sol. Une exécution idéale est démontrée sur la figure 10.

Adaptation : Si l'exercice est trop difficile, il sera réalisé avec les deux mains en appui sur le sol.



Figure 10 : Exécution du pont fessier avec occlusion du membre inférieur, Darbellay & Fardel (2020)

Fente avant

Le sujet se place dans la position du chevalier servant. Ses deux genoux sont fléchis à 90°. La distance entre les pieds et les genoux correspond à la largeur des hanches. Ses mains sont croisées sur le torse. Puis, le sujet peut tendre ses genoux en s'arrêtant juste avant les 0° d'extension, afin de garder la tension musculaire.

À partir de cette position de référence, le patient peut plier ses deux genoux jusqu'à 90° de flexion sans pour autant venir toucher le sol avec le genou de la jambe arrière. Une exécution idéale est démontrée sur la figure 11.

Lors de la première série, c'est la jambe gauche qui sera positionnée en avant. Inversement, lors de la seconde série, c'est la jambe droite qui sera placée en avant.

Adaptation : Si l'exercice est trop difficile, il sera réalisé en prenant un appui avec les mains (mur, table, etc.). Cela permet de décharger les membres inférieurs et d'améliorer la stabilité.



Figure 11 : Exécution de la fente avant avec occlusion du membre inférieur, Darbellay & Fardel (2020)

Pas latéral résisté

Pour prendre la position de référence, le sujet doit placer ses pieds parallèlement et les écarter à la largeur de ses hanches. Ses genoux sont légèrement fléchis, afin de ne pas se trouver en hyperextension. Les hanches sont en position neutre et le tronc est droit. Une bande élastique est placée autour de ses pieds, au niveau de la tête du 5^{ème} métatarsien. Elle est appliquée avec une tension d'approximativement 110% de la longueur sans tension.

Le sujet commence par effectuer une abduction de hanche en chaîne ouverte et va toucher la marque au sol placée à 30 cm de la marque initiale. Il reprend ensuite sa position de référence en gardant constamment la bande élastique sous tension, puis effectue le même mouvement avec l'autre jambe. L'exercice se poursuit ensuite en alternant chaque jambe à chaque répétition. La jambe d'appui maintient tout au long de l'exercice la position décrite ci-dessus. Une exécution idéale est démontrée sur la figure 12.

Lors de la première série, c'est la jambe gauche qui sera déplacée latéralement en premier, suivi de la jambe droite. Inversement, la seconde série débutera par un premier mouvement de la jambe droite, suivi de la jambe gauche.

Adaptation : La difficulté de l'exercice sera définie par la résistance de la bande élastique, et choisie en fonction de la capacité de chaque participant. Si l'exercice est trop difficile, il sera réalisé en prenant un appui avec les mains (mur, table, etc.), afin d'améliorer la stabilité.



Figure 12 : Exécution du pas latéral résisté avec occlusion du membre inférieur, Darbellay & Fardel (2020)

Modalités BFR

Nous proposons d'utiliser des garrots de 11 cm de largeur placés dans le pli inguinal, ou quelques centimètres en-dessous si ces derniers sont inconfortables. Quoiqu'il en soit, il faut essayer de les positionner le plus proximal possible.

Concernant la pression d'occlusion, nous avons opté pour un degré correspondant à 50% de la pression occluant entièrement le flux artériel. La technique utilisée, afin de

déterminer cette pression occlusive, sera décidée ultérieurement en fonction du matériel à disposition.

Enfin, nous avons décidé de maintenir le stimulus occlusif durant les phases de récupération.

Modalités hypoxiques

Nous proposons de réaliser l'entraînement dans une chambre hypoxique à une altitude simulée de 3000m.

De plus, nous avons décidé de maintenir le stimulus hypoxique tout au long de la séance d'entraînement, y compris durant les phases de récupération.

Modalités d'entraînement

Charge

Nous proposons de n'ajouter aucune charge supplémentaire à trois des exercices de notre protocole, soit : le squat, le pont fessier et la fente avant. Nous avons décidé d'effectuer le pas latéral avec une résistance élastique au niveau du 5^{ème} métatarsien. L'élasticité de la bande sera déterminée en fonction des capacités du sujet.

Nombre de répétitions et de séries

Pour ce protocole, nous souhaitons travailler à une intensité sous-maximale. Nous trouvons donc intéressant de nous référer à l'échelle de "répétitions en réserve" de Zourdos et al. (2016) pour définir l'intensité à atteindre. Nous proposons une intensité cible de deux à trois répétitions en-deçà de l'échec musculaire. Cette estimation est par conséquent subjective et propre à chaque sujet.

En ce qui concerne le nombre de séries à effectuer, nous proposons d'en réaliser deux par exercice. En résumé, cela donne un total de huit séries, toutes réalisées à une intensité sous-maximale de deux à trois répétitions en réserve.

Temps de récupération

Nous proposons un temps de récupération de 60 secondes pour l'entraînement en hypoxie et de 90 secondes pour le programme sous BFR. Ces temps de récupération s'appliquent tant pour les pauses inter-séries qu'inter-exercices.

Temps sous tension

Le TST pour chaque répétition est de quatre secondes, réparties respectivement en trois secondes pour la phase excentrique et une seconde pour la phase concentrique. Un métronome sera utilisé pour que ces durées soient respectées.

Le TST total par entraînement sera calculé à la fin de chaque séance. Il ne peut cependant pas être déterminé préalablement, car il dépend du nombre de répétitions qui sera réalisé par les sujets.

Fréquence

Nous avons opté pour un programme comportant huit semaines d'entraînement à raison de deux séances par semaine. Les séances sont suivies d'un minimum de deux jours de récupération.

Avant la phase de test à proprement parler, nous suggérons de réaliser une séance supplémentaire non-comptabilisée dans les huit semaines d'entraînement, afin de permettre au sujet de se familiariser avec les exercices proposés. De plus, cela indiquera aussi au testeur le niveau de performance du sujet. Il pourra ensuite déterminer si une adaptation de l'exercice est nécessaire.

Discussion

L'objectif de cette étude était de déterminer si un programme d'entraînement de force du membre inférieur avec des charges légères sous BFR ou en hypoxie normobarique était réalisable chez un patient souffrant de gonarthrose.

Les résultats ont démontré que les modalités proposées semblaient adaptées à la population cible et que des gains hypertrophiques et de force, ainsi qu'une diminution de la symptomatologie pourraient tout à fait survenir.

Ce chapitre aura pour objectif de justifier les choix effectués dans la partie précédente. Dans un premier temps, nous reviendrons sur le choix de nos exercices. Puis, les modalités de restriction de flux sanguin et d'hypoxie seront débattues. Enfin, nous traiterons des modalités d'entraînement retenues.

Choix des exercices

Squat

Le squat est un exercice ciblé de renforcement du quadriceps. Il est de notoriété publique que le quadriceps est le muscle principalement atteint par la dynapénie dans la pathologie de la gonarthrose (Hurley, 1999; Slemenda et al., 1997). De plus, nous savons qu'une augmentation de la force quadricipitale concorde avec une diminution de la symptomatologie (Chang et al., 2005; Cochrane et al., 2005; Røgind et al., 1998; Topp et al., 2002).

De surcroît, le quadriceps est le muscle responsable de la décélération du genou juste avant la phase d'attaque du talon. Sa faiblesse entraîne donc un impact plus important lors du contact avec le sol (Jefferson et al., 1990). Radin et al. (1991) ont d'ailleurs prouvé que l'impact généré à la suite d'une incoordination de recrutement augmentait de 37% la force de réaction du sol lors de la phase d'attaque du talon. Il nous a donc semblé adapté d'inclure cet exercice dans notre protocole.

Une modification a également été apportée à l'exécution du squat. Nous avons pris le parti de ne pas effectuer un squat « bas », mais simplement d'aller jusqu'à 90° de flexion du genou. Ceci dans le but d'éviter, autant que possible, de provoquer une quelconque douleur aux sujets. En effet, cette patientèle souffre régulièrement d'un manque de mobilité articulaire et ne peut, par conséquent, pas se mobiliser dans l'entièreté de son amplitude (Garstang & Stitik, 2006; Laadhar et al., 2007). En outre, la plupart des patients présente globalement une dynapénie généralisée au niveau du membre inférieur (Slemenda et al., 1997). Il est alors difficile d'imaginer ces patients effectuer un squat au-delà de 90° et remonter de manière autonome et sans douleur.

Pont fessier

De plus, nous avons ajouté l'exercice du pont fessier, afin de renforcer les extenseurs de hanche et de ne pas exclure la chaîne postérieure. En effet, Hinman et al. (2010) arrivent à la conclusion que la tonification de ces derniers contribue à la diminution de la symptomatologie.

En outre, grâce à l'entraînement de force, une amélioration de la force maximale est attendue, ainsi que des adaptations neuromusculaires, et ce afin de réduire la co-activation agoniste-antagoniste. Topp et al. (2002) ont d'ailleurs conclu qu'un entraînement en résistance pouvait atténuer l'impact de la charge sur le genou, non seulement grâce à une

augmentation de la force, mais également grâce à une amélioration de la coordination intra- et intermusculaire des extenseurs du genou.

En effet, les patients souffrant d'arthrose du genou révèlent fréquemment une activité augmentée des ischio-jambiers. Il est donc recommandé de ne pas se focaliser uniquement sur le renforcement du quadriceps, mais également sur le rétablissement d'une balance musculaire optimale, afin d'équilibrer la charge au niveau du genou (Hortobágyi et al., 2005). Grâce à cet exercice, la musculature fessière et les fléchisseurs du genou sont ainsi tonifiés.

Fente avant

Le troisième exercice inclus est la fente avant. Cet exercice cible une grande partie des muscles du membre inférieur et est plus exigeant en termes de force et d'équilibre que le squat. Les raisons de réaliser cet exercice sont similaires à celles énoncées précédemment. En effet, la fente avant permet de renforcer le quadriceps et inclut également les muscles de la chaîne postérieure. Il est donc complémentaire aux autres exercices et pertinent pour notre programme.

Pas latéral résisté

Certaines études ont mis en évidence que la tonification des abducteurs de hanche contribue à la diminution de la symptomatologie et à l'amélioration de la fonction articulaire (Bennell et al., 2010; Hinman et al., 2010). L'exercice du pas latéral cible principalement la musculature abductrice de hanche. Lorsque la résistance élastique est appliquée à la base du 5^e métatarsien, cet exercice active les muscles moyen et grand fessiers, sans pour autant augmenter l'activité du muscle tenseur du fascia lata (Lewis et al., 2018). Cet exercice est, par conséquent, pertinent et complémentaire à ceux proposés ci-dessus.

Qui plus est, Chang et al. (2005) ont observé qu'une bonne stabilité lors de la phase d'abduction de hanche durant la marche avait un effet protecteur contre le développement de l'arthrose ipsilatérale du compartiment médial. Ils ont également conclu qu'un manque de force des abducteurs augmentait de 50% le risque de développement de gonarthrose médiale. Le renforcement de cette musculature sert donc aussi de traitement préventif à une potentielle péjoration des symptômes.

Modalités BFR

Scott et al. (2015) ont défini un panel de recommandations concernant l'utilisation du BFR. La largeur du garrot est déterminée par rapport à la taille du membre soumis à l'occlusion. Un garrot de taille large est donc indiqué pour les groupes musculaires volumineux, comme c'est le cas pour les muscles cruraux. Scott et al. (2015) écrivent que sa largeur doit être comprise entre 6 cm et 13,5 cm pour le membre inférieur.

Ensuite, le garrot doit être placé sur la partie proximale du membre (Scott et al., 2015). Il a également été prouvé que la restriction du flux sanguin provoque une hypertrophie en amont de l'occlusion (Abe et al., 2012; Yasuda et al., 2010). Cette découverte justifie donc les exercices ciblant le renforcement de la musculature fessière. Elle permet également le positionnement du garrot pneumatique quelques centimètres en dessous du pli inguinal dans un souci de confort.

La pression du garrot doit être comprise entre 50% et 80% de la pression occluant complètement le flux artériel (Scott et al., 2015). À partir de ces données, une pression de 50% semble garantir un confort supérieur, ce qui impliquerait sans doute une meilleure adhésion des sujets dans le cadre d'une étude future.

Modalités hypoxiques

En ce qui concerne l'altitude simulée d'entraînement, certains risques pour la santé des patients peuvent déjà survenir au-delà de 3000m (Millet et al., 2016). Un entraînement à plus haute altitude présente également toutes autres sortes de risques cardio-pulmonaires : hypoxémie (Levine et al., 1997), hypertension pulmonaire (Valencia-Flores et al., 2004), arythmies (Kujaník et al., 2000), etc. C'est pourquoi Millet et al., (2016) recommandent une altitude modérée comprise entre 1800m et 3000m. Une altitude modérée permet également de limiter les fluctuations d'oxygénation cérébrale (Subudhi et al., 2007), ce qui, dans le cas contraire, pourrait atténuer les gains d'hypertrophie et de force souhaités (Scott et al., 2014b). Plusieurs auteurs recommandent également une altitude modérée, notamment Feriche et al. (2017) (13-16% de F_iO_2) et Scott et al. (2014b) (14-16% de F_iO_2). En outre, au-delà de 3000m, le contrôle postural est altéré, ce qui rend la réalisation des exercices plus compliquée (Degache et al., 2012).

De plus, la sécrétion de l'hormone de croissance (GH), directement responsable de l'hypertrophie musculaire, augmente au-delà de 3000m d'altitude (Kjaer et al., 1988; Kon et al., 2010), mais pas entre 2000m et 3000m (Katayama et al., 2010). Une altitude d'entraînement de 3000m semble donc indiquée, afin de rester hors de la zone de risques pour la santé des participants et de maintenir une altitude suffisante pour observer une augmentation de la sécrétion de la GH.

Enfin, selon plusieurs auteurs, le stimulus hypoxique est maintenu durant les récupérations inter-séries (Manimmanakorn al., 2013a; Scott et al., 2018b; Yan et al., 2016), afin de maintenir un stress métabolique suffisant.

Modalités d'entraînement

Charge

Traditionnellement, la charge nécessaire pour induire de l'hypertrophie se situe aux alentours de 70% de la 1-RM (American College of Sports Medicine, 2009). Certaines études laissent cependant penser qu'un entraînement avec de faibles charges pourrait également convenir. En effet, l'hypertrophie est alors induite par des facteurs métaboliques et non plus mécaniques (Feriche et al., 2017), pour autant qu'un nombre important de répétitions soit réalisé (Manimmanakorn et al., 2013b; Manimmanakorn et al., 2013a).

Toutefois, selon Lasevicus et al. (2018), ce sont bien ces deux mécanismes qui influencent l'hypertrophie. À volume d'entraînement similaire, un protocole orienté dans le but d'augmenter le stress métabolique (grand nombre de répétitions, faible intensité) et un protocole visant à augmenter la tension mécanique (petit nombre de répétitions, haute intensité) semblent avoir des effets similaires sur l'hypertrophie. De surcroît, pour une population souffrant d'arthrose, une amélioration de la fonction, de la douleur et de la force a été observée, que ce soit à la suite d'entraînements de force à haute ou à basse intensité (American College of Sports Medicine, 2013). Enfin, quelle que soit la modalité d'entraînement utilisée, un échauffement préalable de 5 à 10 min semble indispensable chez les patients souffrant d'arthrose, afin de minimiser les risques d'exacerbation de la douleur (American College of Sports Medicine, 2013).

Concernant l'entraînement sous BFR, la charge des exercices effectués devrait être comprise entre 20% et 40% de la 1-RM (Scott et al., 2015). D'autres études prouvent également le gain hypertrophique grâce à un entraînement de faible intensité (Abe et al.,

2012b; Cook et al., 2007; Loenneke & Pujol, 2009; Scott et al., 2014a). Il semble que les gains de force découlant d'un entraînement sous BFR à faible intensité soient supérieurs à ceux obtenus lors d'un entraînement similaire sans occlusion, mais plus faibles que ceux obtenus lors d'un entraînement sans occlusion à haute intensité (Lixandrão et al., 2018). Malgré cela, cette méthode paraît adéquate pour des sujets incapables de travailler à haute intensité (maladies inflammatoires, patients fragiles...) mais souhaitant tout de même développer leur masse musculaire (Hughes et al., 2017; Lixandrão et al., 2018; Loenneke et al., 2012; Patterson et al., 2019).

L'entraînement de force en hypoxie avec de faible charge a été moins investigué que l'entraînement sous BFR. Manimmanakorn et al. (2013a) ont cependant trouvé des gains de force et d'hypertrophie lors d'un entraînement en hypoxie avec des charges faibles, mais avec un nombre de répétitions élevées. Au contraire, dans leur étude avec une charge correspondant à 30% de la 1-RM, Friedman et al. (2003) ne trouvent pas de gain hypertrophique, ni de force, par rapport à un entraînement en normoxie équivalent, malgré un nombre important de répétitions effectuées. Toutefois, cette étude présente certaines limites. En effet, les plages allouées à la récupération se déroulaient en normoxie, ce qui diminue considérablement le stimulus hypoxique. De plus, la durée d'intervention ne comprenait que quatre semaines, ce qui pourrait expliquer pourquoi aucune amélioration significative n'a été observée. Ces résultats suggèrent donc que la dose hypoxique, ainsi que la durée de récupération inter-séries conditionnent les effets d'un entraînement à faible charge (Scott et al., 2014b). Quoi qu'il en soit, Scott et al. (2014a) soulignent l'importance de continuer à investiguer le sujet, afin de vérifier si les recommandations d'entraînement sous BFR sont transposables à l'entraînement en hypoxie.

Nombre de répétitions et de séries

Selon le principe de taille de Henneman, les UM sont recrutées par ordre de taille (Henneman et al., 1965). Cela signifie qu'il faut un certain seuil d'activation pour que les grandes UM soient recrutées. Ce seuil est atteint immédiatement lors d'un entraînement avec des charges lourdes, et est repoussé dans le temps lors d'un entraînement avec des charges légères. En effet, dans ce second cas de figure, il faut que le muscle acquière un certain niveau de fatigue pour atteindre ce seuil. Il a donc été émis comme hypothèse

qu'un entraînement jusqu'à l'échec entraîne un recrutement total des UM, ce qui semble être un prérequis indispensable à l'hypertrophie musculaire (Wernbom et al., 2007).

La question de la pertinence de s'entraîner jusqu'à l'échec musculaire a été posée par Schoenfeld et Grgic (2019). En effet, en comparant un entraînement de haute et de basse intensité, tous deux allant jusqu'à l'échec musculaire, Schoenfeld et al. (2015) trouvent des gains hypertrophiques similaires. Cependant, les adaptations de force sont maximisées par la haute intensité. Concernant les adaptations de force et d'hypertrophie, différentes études sont arrivées à la conclusion que l'entraînement jusqu'à l'échec musculaire est moins important lorsque des charges lourdes sont utilisées que lors de séances avec des charges légères (Lasevicius et al., 2019; Sampson & Groeller, 2016; Schoenfeld & Grgic, 2019). Il semblerait même ne pas être nécessaire chez le sujet âgé dans le but de développer la masse musculaire (da Silva et al., 2018), en raison de la récupération post-exercice plus longue chez cette population (Schoenfeld & Grgic, 2019). Enfin, Nobrega et al. (2018) ont mené une étude sur des sujets n'étant pas entraînés et sont arrivés à la conclusion qu'un entraînement proche de l'échec musculaire (arrêt deux ou trois répétitions avant l'échec) est tout aussi efficace qu'un entraînement jusqu'à l'échec musculaire pour augmenter la force et l'hypertrophie.

Afin de déterminer une intensité cible inférieure à l'échec musculaire, il serait intéressant de se baser sur l'échelle de « répétitions en réserve » de Zourdos et al. (2016). Cependant, la limite de cette méthode résulte dans le fait que les sujets ont tendance à sous-estimer le nombre de répétitions les conduisant à l'échec lors des premiers entraînements, tout en étant plus précis avec le temps (Hackett et al., 2012). Il serait donc pertinent d'inclure une période de familiarisation, ce qui diminuerait ce biais.

De plus, arrêter son effort deux à trois répétitions avant l'échec musculaire correspond à une intensité de 7-8/10 sur l'échelle de Borg modifiée (Zourdos et al., 2016) [[Annexe 8](#)]. Cette intensité nous permet également de tolérer des douleurs pouvant aller jusqu'à 3/10 sur l'échelle visuelle analogique (EVA) (Meakins & Cormack, 2020).

Concernant l'entraînement sous restriction de flux sanguin, Scott et al., (2015) recommandent de réaliser entre 50 et 80 répétitions par groupe musculaire, sans forcément chercher l'épuisement total du muscle.

Enfin, en ce qui concerne le nombre de séries par exercice, l'American College of Sports Medicine (2009) suggère d'en réaliser entre une et trois chez le sujet âgé dans un but

hypertrophique et de gains de force. Leurs recommandations se portent également sur un nombre similaire de séries pour développer la force chez le novice en entraînement de force. Pour ce protocole de renforcement du membre inférieur, un nombre intermédiaire de deux séries par exercice a été retenu. Cet élément a été déterminé en fonction de la population qui prendra part à l'étude, mais également car certains des exercices sollicitent les mêmes groupes musculaires.

Temps de récupération

Le temps de récupération doit permettre au sujet de recouvrir une partie de ses capacités avant d'amorcer une nouvelle série d'exercices. Les temps de récupération peuvent être court (<30 secondes), moyen (60 à 90 secondes) ou long (>180 secondes) (Willardson, 2006). Une récupération courte induira un stress métabolique plus grand et aura un effet sur la qualité de l'exercice, ainsi que sur le nombre de répétitions réalisées. Cela impactera donc aussi la force développée au cours des répétitions. Dans le cas d'une pause plus longue, l'effet bénéfique de l'hypoxie sur les adaptations musculaires serait perdu, le stress métabolique n'étant plus assez élevé (Schoenfeld, 2010).

En ce qui concerne l'occlusion, il est important de ne pas dépasser les 60 secondes pendant les pauses inter-séries, afin d'éviter une trop grande clairance sanguine et de maintenir le stress métabolique. Ces recommandations s'adressent à une population saine, et ne conviennent donc pas forcément à une population clinique (Scott et al., 2015).

Pour l'entraînement de force à faible intensité en hypoxie, Manimmanakorn et al. (2013b) recommandent un temps de récupération de 30 secondes inter-séries. Scott et al. (2014b) suggèrent l'utilisation de pauses allant de 30 à 60 secondes pour une intensité d'exercice faible à moyenne. Enfin, Nishimura et al. (2010), ont défini un temps de récupération de 60 secondes inter-séries, mais leurs sujets se sont entraînés à 70% de leur 1-RM.

Quoi qu'il en soit, Scott et al. (2014a) recommandent une récupération plus longue sous BFR qu'en hypoxie, pour un entraînement similaire, ceci dans l'idée de tenir compte de la différence de stress métabolique engendré dans le muscle. En effet, les métabolites s'accumulent uniquement dans les membres occlus sous BFR, alors qu'ils sont répartis de manière systémique en hypoxie.

Au vu de la situation clinique des sujets qui prendront part au protocole, il a été décidé d'ajouter 30 secondes au temps de récupération maximal sous BFR recommandé par Scott

et al. (2015), soit un temps de 90 secondes. De même, afin de coller aux conclusions de Scott et al. (2014a), un temps de récupération de 60 secondes a été défini pour l'entraînement en hypoxie.

Temps sous tension

Comme recommandé par Toigo et Boutellier (2006), le TST a été défini dans ce programme d'entraînement dans un souci de précision. Ces auteurs répartissent également le TST passé dans chaque mode de contraction (concentrique, isométrique et excentrique), afin d'en avoir une distribution temporelle complète.

En se basant sur la littérature existante, il semblerait qu'une exécution rapide soit bénéfique pour l'hypertrophie (Schoenfeld, 2010). Nogueira et al. (2009) concluent notamment dans leur étude qu'une contraction concentrique d'une seconde démontre un impact plus grand sur la section transversale du muscle qu'une contraction de trois secondes chez la personne âgée. Cependant, d'autres recherches laissent penser qu'une vitesse moyenne de contraction serait plus bénéfique pour les adaptations hypertrophiques (Häkkinen et al., 1985).

Quoi qu'il en soit, Schoenfeld et al. (2010) déclarent que la vitesse d'exécution à une plus grande importance lors de la phase excentrique pour les adaptations hypertrophiques. De plus, et bien que les phases excentrique et concentrique jouent un rôle dans l'hypertrophie, la majorité des études tend à dire que le travail excentrique a un plus grand effet sur la masse musculaire, et ce à cause d'une tension musculaire supérieure lors de ce type de contraction (Schoenfeld, 2010).

De plus, durant la phase excentrique, la fibre musculaire se contracte et subit un allongement simultanément (Duc, 2010). On observe alors une tension importante au niveau des structures qui composent le muscle, en particulier son unité contractile, le sarcomère. Ce dernier peut même être détérioré en cas de tension trop importante (Allen, 2001; Friden & Lieber, 2001; Proske & Morgan, 2001). La contraction excentrique provoque en effet plus de dommages musculaires que les contractions concentrique et isométrique (McHugh et al., 2000). Enfin, des preuves existent quant à un plus grand recrutement des UM lors de la phase excentrique que lors des autres modes de contraction (McHugh et al., 2000; Nardone et al., 1989).

Dans le cadre de ce travail, une durée d'exécution de quatre secondes a été décidée, avec trois secondes de phase excentrique et une seconde de phase concentrique. En effet, en imposant une longue phase excentrique, on insiste sur l'effet mécanique de l'hypertrophie. De plus, une exécution lente du mouvement offre aux sujets un meilleur contrôle dans la réalisation des mouvements et permet une standardisation du protocole. Enfin, il est également important de ne pas relâcher la tension entre les phases concentrique et excentrique. Maintenir la tension musculaire tout au long de l'exercice permet d'augmenter l'ischémie musculaire et l'hypoxémie locale, et ainsi d'accroître la réponse hypertrophique (Tanimoto et al., 2008).

Fréquence

Une fréquence d'entraînement de deux à trois jours par semaine est fortement recommandée pour le sujet novice, que ce soit pour les adaptations de force ou hypertrophiques (American College of Sports Medicine, 2009; Garber et al., 2011). Le niveau d'évidence se situe dans la catégorie A. De plus, pour le patient souffrant d'arthrose, l'ACSM (2013) recommande de réaliser des exercices de renforcement 2 à 3 fois par semaine. C'est pourquoi une fréquence de deux entraînements par semaine a été proposée dans ce travail.

De plus, il est important de garantir deux à trois jours de récupération entre les séances, afin de maximiser les gains de force et d'hypertrophie (Bickel et al., 2005; Garber et al., 2011).

Enfin, durant les premières semaines d'un entraînement de force, ce sont les adaptations neurales qui dominent (Deschenes & Kraemer, 2002; Moritani & deVries, 1979; Sale, 1988), alors que les adaptations hypertrophiques ne deviennent prédominantes qu'à partir des semaines trois à cinq. Phillips (2000) abonde dans le même sens en soulignant que les adaptations hypertrophiques n'apparaissent significativement qu'au bout de la sixième semaine. Pour ce dernier, ce n'est qu'à partir de là que les facteurs neuraux et hypertrophiques interagissent pleinement entre eux dans l'expression de la force développée. Un total d'une durée de huit semaines a donc été décidé pour cette étude, afin de garantir une période suffisante pour l'apparition de ces adaptations.

Forces et limites

Les forces de ce travail résident dans une recherche littéraire globale et approfondie, ainsi que dans l'expérimentation de toutes les modalités, retenues ou non. Cela donne du crédit aux propositions faites dans ce travail, chaque élément proposé étant réalisable et applicable en l'état. Il faut également mettre en évidence la compétence des experts dans leur domaine respectif. De ce fait, chaque recommandation et suggestion de leur part était d'une grande aide et contribuait à la qualité de ce travail.

Cependant, il est également possible de relever quelques limites présentes dans ce travail. En effet, bien que chaque modalité ait été testée, elles n'ont malheureusement pas pu l'être par la population cible. En effet, l'expérimentation sur un faible échantillon de sujets nécessitait tout de même de soumettre une demande à la commission d'éthique, ce qui n'était pas réalisable dans le temps imparti. De plus, malgré leur grande pertinence, les experts n'étaient qu'au nombre de quatre. Un panel plus conséquent de spécialistes aurait sûrement amené plus d'éléments à notre discussion. Enfin, malgré une recherche littéraire qui s'est voulue la plus complète possible, une documentation méthodique de cette partie aurait apporté plus de crédit à ce travail.

Conclusion

En conclusion, il semble qu'un entraînement de force focalisé sur le membre inférieur en hypoxie ou sous BFR pour une population souffrant de gonarthrose soit tout à fait réalisable. Mieux, au vu des dernières découvertes, un tel entraînement semble pouvoir améliorer la force de ces patients et, ainsi, réduire les douleurs liées à cette pathologie. De plus, il offre une alternative aux patients fragiles autre qu'un entraînement avec des charges lourdes avec des gains, qui même inférieurs, restent significatifs. En effet, les exercices choisis, ainsi que les modalités retenues, paraissent adaptés à la population cible et optimaux pour induire les adaptations musculaires souhaitées. De plus, tous ces paramètres sont applicables en hypoxie et sous BFR, ce qui permettrait potentiellement de les comparer dans une étude future.

Enfin, une séance de familiarisation et d'explications semble nécessaire pour préparer les sujets à l'intervention. Il faudra également rendre les sujets attentifs au fait qu'un léger inconfort musculaire ou articulaire est courant après un tel entraînement, et tout à fait

normal jusqu'à deux heures après l'effort, et qu'il ne signifie pas une aggravation des dommages articulaires (American College of Sports Medicine, 2013).

Une étude future comprenant deux groupes d'intervention (un sous BFR et un en hypoxie) et un groupe contrôle en normoxie, réalisant tous trois le même protocole décrit ci-dessus serait souhaitable. Il serait ainsi possible de déterminer la véracité de notre seconde hypothèse, à savoir que ces deux types d'entraînement induiraient une hypertrophie ainsi que des gains de force supérieurs à un entraînement similaire en normoxie. Enfin, l'hypothèse d'une symptomatologie réduite à la suite d'un tel entraînement pourrait également être vérifiée.

Bibliographie

- Aagaard, P., Andersen, J. L., Dyhre-Poulsen, P., Leffers, A. M., Wagner, A., Magnusson, S. P., ... Simonsen, E. B. (2001). A mechanism for increased contractile strength of human pennate muscle in response to strength training : Changes in muscle architecture. *The Journal of Physiology*, 534(Pt. 2), 613-623. doi: 10.1111/j.1469-7793.2001.t01-1-00613.x
- Abe, T., Kearns, C. F., & Sato, Y. (2006). Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training. *J Appl Physiol*, 100, 7.
- Abe, T., Loenneke, J. P., Fahs, C. A., Rossow, L. M., Thiebaud, R. S., & Bemben, M. G. (2012). Exercise intensity and muscle hypertrophy in blood flow-restricted limbs and non-restricted muscles : A brief review. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 32(4), 247-252. doi: 10.1111/j.1475-097X.2012.01126.x
- Allegrente, J. P., & Marks, R. (2003). Self-efficacy in management of osteoarthritis. *Rheumatic Disease Clinics of North America*, 29(4), 747-768. doi: 10.1016/S0889-857X(03)00060-7
- Allen, D. G. (2001). Eccentric muscle damage : Mechanisms of early reduction of force. *Acta Physiologica Scandinavica*, 171(3), 311-319. doi: 10.1046/j.1365-201x.2001.00833.x
- American College of Rheumatology. (2000). Recommendations for the medical management of osteoarthritis of the hip and knee : 2000 update. American College of Rheumatology Subcommittee on Osteoarthritis Guidelines. *Arthritis and Rheumatism*, 43(9), 1905-1915. doi: 10.1002/1529-0131(200009)43:9<1905::AID-ANR1>3.0.CO;2-P
- American College of Sports Medicine. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 41(3), 687-708. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181915670
- American College of Sports Medicine. (2013). *ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription*. University of Connecticut: Lippincott, Williams & Wilkins.
- Arden, N., & Nevitt, M. C. (2006). Osteoarthritis : Epidemiology. *Best Practice & Research Clinical Rheumatology*, 20(1), 3-25. doi: 10.1016/j.berh.2005.09.007

- Baker, K. R., Nelson, M. E., Felson, D. T., Layne, J. E., Sarno, R., & Roubenoff, R. (2001). The efficacy of home based progressive strength training in older adults with knee osteoarthritis : A randomized controlled trial. *The Journal of Rheumatology*, 28(7), 1655-1665.
- Bandura, A. (1977). Self-efficacy : Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, 191–215.
- Bandura, A. (1982). Self-Efficacy Mechanism in Human Agency. doi: 10.1037/0003-066X.37.2.122
- Beckwée, D., Delaere, A., Aelbrecht, S., Baert, V., Beaudart, C., Bruyere, O., ... Bautmans, I. (2019). Exercise Interventions for the Prevention and Treatment of Sarcopenia. A Systematic Umbrella Review. *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 23(6), 494-502. doi: 10.1007/s12603-019-1196-8
- Beckwée, D., Vaes, P., Cnudde, M., Swinnen, E., & Bautmans, I. (2013). Osteoarthritis of the knee : Why does exercise work? A qualitative study of the literature. *Ageing Research Reviews*, 12(1), 226-236. doi: 10.1016/j.arr.2012.09.005
- Bennell, K. L., Hunt, M. A., Wrigley, T. V., Hunter, D. J., McManus, F. J., Hodges, P. W., ... Hinman, R. S. (2010). Hip strengthening reduces symptoms but not knee load in people with medial knee osteoarthritis and varus malalignment : A randomised controlled trial. *Osteoarthritis and Cartilage*, 18(5), 621-628. doi: 10.1016/j.joca.2010.01.010
- Bickel, C. S., Slade, J., Mahoney, E., Haddad, F., Dudley, G. A., & Adams, G. R. (2005). Time course of molecular responses of human skeletal muscle to acute bouts of resistance exercise. *J Appl Physiol*, 98, 7.
- Blalock, D., Miller, A., Tilley, M., & Wang, J. (2015). Joint Instability and Osteoarthritis. *Clinical Medicine Insights : Arthritis and Musculoskeletal Disorders*, 8, CMAMD.S22147. doi: 10.4137/CMAMD.S22147
- Börjesson, M., Robertson, E., Weidenhielm, L., Mattsson, E., & Olsson, E. (1996). Physiotherapy in knee osteoarthrosis : Effect on pain and walking. *Physiotherapy Research International*, 1(2), 89-97. doi: 10.1002/pri.6120010205
- Brandt, K. D., Radin, E. L., Dieppe, P. A., & Putte, L. (2006). Yet more evidence that osteoarthritis is not a cartilage disease. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 65(10), 1261-1264. doi: 10.1136/ard.2006.058347

- Brosseau, L., Wells, G., & Tugwell, P. (2005). Ottawa Panel Evidence-Based Clinical Practice Guidelines for Therapeutic Exercises and Manual Therapy in the Management of Osteoarthritis. *Physical Therapy*. doi: 10.1093/ptj/85.9.907
- Brosseau, L., Taki, J., Desjardins, B., Thevenot, O., Fransen, M., Wells, G. A., ... McLean, L. (2017). The Ottawa panel clinical practice guidelines for the management of knee osteoarthritis. Part two : Strengthening exercise programs. *Clinical Rehabilitation*, 31(5), 596-611. doi: 10.1177/0269215517691084
- Bryk, F. F., dos Reis, A. C., Fingerhut, D., Araujo, T., Schutzer, M., Cury, R. de P. L., ... Fukuda, T. Y. (2016). Exercises with partial vascular occlusion in patients with knee osteoarthritis : A randomized clinical trial. *Knee Surgery, Sports Traumatology, Arthroscopy*, 24(5), 1580-1586. doi: 10.1007/s00167-016-4064-7
- Chang, A., Hayes, K., Dunlop, D., Song, J., Hurwitz, D., Cahue, S., & Sharma, L. (2005). Hip abduction moment and protection against medial tibiofemoral osteoarthritis progression. *Arthritis & Rheumatism*, 52(11), 3515-3519. doi: 10.1002/art.21406
- Cochrane, T., Davey, R., & Matthes, S. E. (2005). Randomised controlled trial of the cost-effectiveness of water-based therapy for lower limb osteoarthritis. doi: 10.3310/hta9310
- Cometti, G. (2005) Les mécanismes de la force. *UFR STAPS, Dijon, Université de Bourgogne*.
- Conaghan, P. G., Dickson, J., & Grant, R. L. (2008). Care and management of osteoarthritis in adults : Summary of NICE guidance. *BMJ : British Medical Journal*, 336(7642), 502-503. doi: 10.1136/bmj.39490.608009.AD
- Cook, S. B., Clark, B. C., & Ploutz-Snyder, L. L. (2007). Effects of Exercise Load and Blood-Flow Restriction on Skeletal Muscle Function: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 39(10), 1708-1713. doi: 10.1249/mss.0b013e31812383d6
- da Silva, L. X. N., Teodoro, J. L., Menger, E., Lopez, P., Grazioli, R., Farinha, J., ... Cadore, E. L. (2018). Repetitions to failure versus not to failure during concurrent training in healthy elderly men : A randomized clinical trial. *Experimental Gerontology*, 108, 18-27. doi: 10.1016/j.exger.2018.03.017

- Dadabo, J., Fram, J., & Jayabalan, P. (2019). Noninterventional Therapies for the Management of Knee Osteoarthritis. *The Journal of Knee Surgery*, 32(01), 046-054. doi: 10.1055/s-0038-1676107
- Dangott, B., Schultz, E., & Mozdziak, P. E. (2000). Dietary Creatine Monohydrate Supplementation Increases Satellite Cell Mitotic Activity During Compensatory Hypertrophy. *International Journal of Sports Medicine*, 21(1), 13-16. doi: 10.1055/s-2000-8848
- Degache, F., Larghi, G., Faiss, R., Deriaz, O., & Millet, G. (2012). Hypobaric versus Normobaric Hypoxia : Same Effects on Postural Stability? *High Altitude Medicine & Biology*, 13(1), 40-45. doi: 10.1089/ham.2011.1042
- Deschenes, M. R., & Kraemer, W. J. (2002). Performance and physiologic adaptations to resistance training. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 81(11 Suppl), S3-16. doi: 10.1097/00002060-200211001-00003
- Duc, M. (2010). *Effet protecteur d'un microcycle de musculation excentrique au développé couché dans la prévention des douleurs musculaires d'apparition retardée* (Mémoire de maîtrise inédit). Université de Genève.
- Farrokhi, S., Voycheck, C. A., Klatt, B. A., Gustafson, J. A., Tashman, S., & Fitzgerald, G. K. (2014). Altered Tibiofemoral Joint Contact Mechanics and Kinematics in Patients with Knee Osteoarthritis and Episodic Complaints of Joint Instability. *Clinical biomechanics (Bristol, Avon)*, 29(6), 629-635. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2014.04.014
- Felson, D. T. (1988). Epidemiology of hip and knee osteoarthritis. *Epidemiologic reviews*, 10, 1-28.
- Ferliche, 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. doi: 10.1186/s40798-017-0078-z
- Ferliche, B., Schoenfeld, B. J., Bonitch-Gongora, J., de la Fuente, B., Almeida, F., Argüelles, J., ... Padial, P. (2019). Altitude-induced effects on muscular metabolic stress and hypertrophy-related factors after a resistance training session. *European Journal of Sport Science*, 1-10. doi: 10.1080/17461391.2019.1691270

- Friden, J., & Lieber, R. L. (2001). Eccentric exercise-induced injuries to contractile and cytoskeletal muscle fibre components. *Acta Physiologica Scandinavica*, 171(3), 321-326. doi: 10.1046/j.1365-201x.2001.00834.x
- 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—European Journal of Physiology*, 446(6), 742-751. doi: 10.1007/s00424-003-1133-9
- Garber, C. E., Blissmer, B., Deschenes, M. R., Franklin, B. A., Lamonte, M. J., Lee, I.-M., ... Swain, D. P. (2011). Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 43(7), 1334–1359. doi: 10.1249/MSS.0b013e318213fefb
- Garstang, S. V., & Stitik, T. P. (2006). Osteoarthritis : epidemiology, risk factors, and pathophysiology. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 85(11), S2. doi: 10.1097/01.phm.0000245568.69434.1a
- Hackett, D. A., Johnson, N. A., Halaki, M., & Chow, C.-M. (2012). A novel scale to assess resistance-exercise effort. *Journal of Sports Sciences*, 30(13), 1405-1413. doi: 10.1080/02640414.2012.710757
- Häkkänen, K., Komi, P. V., & Alén, M. (1985). Effect of explosive type strength training on isometric force- and relaxation-time, electromyographic and muscle fibre characteristics of leg extensor muscles. *Acta Physiologica Scandinavica*, 125(4), 587-600. doi: 10.1111/j.1748-1716.1985.tb07760.x
- Hartman, C. A., Manos, T. M., Winter, C., Hartman, D. M., Li, B., & Smith, J. C. (2000). Effects of tai chi training on function and quality of life indicators in older adults with osteoarthritis. *Journal of the American Geriatrics Society*, 48(12), 1553-1559. doi: 10.1111/j.1532-5415.2000.tb03863.x
- Heinonen, A., Kannus, P., Sievänen, H., Oja, P., Pasanen, M., Rinne, M., ... Vuori, I. (1996). Randomised controlled trial of effect of high-impact exercise on selected risk factors for osteoporotic fractures. *The Lancet*, 348(9038), 1343-1347. doi: 10.1016/S0140-6736(96)04214-6

- Henneman, E., Somjen, G., & Carpenter, D. O. (1965). Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *Journal of Neurophysiology*, 28(3), 560-580. doi: 10.1152/jn.1965.28.3.560
- Hinman, R. S., Heywood, S. E., & Day, A. R. (2007). Aquatic physical therapy for hip and knee osteoarthritis : results of a single-blind randomized controlled trial. *Physical Therapy*, 87(1), 32-43. doi: 10.2522/ptj.20060006
- Hinman, R. S., Hunt, M. A., Creaby, M. W., Wrigley, T. V., McManus, F. J., & Bennell, K. L. (2010). Hip muscle weakness in individuals with medial knee osteoarthritis. *Arthritis Care & Research*, 62(8), 1190-1193. doi: 10.1002/acr.20199
- Hollander, D., Reeves, G., Clavier, J., Francois, M., Thomas, C., & Kraemer, R. (2010). Partial occlusion during resistance exercise alters effort sense and pain. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(1), 235-243. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181c7badf
- Hortobágyi, T., Solnik, S., Gruber, A., Rider, P., Steinweg, K., Helseth, J., & DeVita, P. (2009). Interaction between age and gait velocity in the amplitude and timing of antagonist muscle coactivation. *Gait & Posture*, 29(4), 558-564. doi: 10.1016/j.gaitpost.2008.12.007
- Hortobágyi, T., Westerkamp, L., Beam, S., Moody, J., Garry, J., Holbert, D., & DeVita, P. (2005). Altered hamstring-quadriceps muscle balance in patients with knee osteoarthritis. *Clinical Biomechanics*, 20(1), 97-104. doi: 10.1016/j.clinbiomech.2004.08.004
- Huang, M.-H., Lin, Y.-S., Yang, R.-C., & Lee, C.-L. (2003). A comparison of various therapeutic exercises on the functional status of patients with knee osteoarthritis. *Seminars in Arthritis and Rheumatism*, 32(6), 398-406. doi: 10.1053/sarh.2003.50021
- Huang, M.-H., Yang, R.-C., Lee, C.-L., Chen, T.-W., & Wang, M.-C. (2005). Preliminary results of integrated therapy for patients with knee osteoarthritis. *Arthritis Care & Research*, 53(6), 812-820. doi: 10.1002/art.21590
- Hughes, L., Paton, B., Rosenblatt, B., Gissane, C., & Patterson, S. D. (2017). Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation : A systematic review and meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine*, 51(13), 1003-1011. doi: 10.1136/bjsports-2016-097071

- Hurley, M. V. (1999). The role of muscle weakness in the pathogenesis of osteoarthritis. *Rheumatic Disease Clinics of North America*, 25(2), 283-298. doi: 10.1016/S0889-857X(05)70068-5
- Hutton, R. S., & Atwater, S. W. (1992). Acute and chronic adaptations of muscle proprioceptors in response to increased use. *Sports Medicine*, 14(6), 406-421. doi: 10.2165/00007256-199214060-00007
- Iwamoto, Y., Takahashi, M., & Shinkoda, K. (2017). Muscle co-contraction in elderly people change due to postural stability during single-leg standing. *Journal of Physiological Anthropology*, 36(1), 43. doi: 10.1186/s40101-017-0159-1
- Jan, M. H., & Lai, J. S. (1991). The effects of physiotherapy on osteoarthritic knees of females. *Journal of the Formosan Medical Association = Taiwan yi zhi*, 90(10), 1008-1013.
- Jan, M.-H., Lin, C.-H., Lin, Y.-F., Lin, J.-J., & Lin, D.-H. (2009). Effects of weight-bearing versus nonweight-bearing exercise on function, walking speed, and position sense in participants with knee osteoarthritis : a randomized controlled trial. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 90(6), 897-904. doi: 10.1016/j.apmr.2008.11.018
- Jefferson, R. J., Collins, J. J., Whittle, M. W., Radin, E. L., & O'Connor, J. J. (1990). The role of the quadriceps in controlling impulsive forces around heel strike. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 204(1), 21-28. doi: 10.1243/PIME_PROC_1990_204_224_02
- Johansson, H., Sjölander, P., & Sojka, P. (1991). A sensory role for the cruciate ligaments. *Clinical orthopaedics and related research*, (268), 161-178.
- Jones, G. M., & Watt, D. G. D. (1971). Muscular control of landing from unexpected falls in man. *The Journal of Physiology*, 219(3), 729-737. doi: 10.1113/jphysiol.1971.sp009685
- Jorge, R. T. B., Souza, M. C. de, Chiari, A., Jones, A., Fernandes, A., Júnior, I. L., & Natour, J. (2015). Progressive resistance exercise in women with osteoarthritis of the knee : a randomized controlled trial. *Clinical Rehabilitation*, 29(3), 234-243. doi: 10.1177/0269215514540920

- Kacin, A., & Strazar, K. (2011). Frequent low-load ischemic resistance exercise to failure enhances muscle oxygen delivery and endurance capacity. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(6), e231-241. doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01260.x
- Kannus, P. (1988). Long-term results of conservatively treated medial collateral ligament injuries of the knee joint. *Clinical orthopaedics and related research*, (226), 103-112.
- Kannus, P. (1989). Nonoperative treatment of Grade II and III sprains of the lateral ligament compartment of the knee. *The American Journal of Sports Medicine*, 17(1), 83-88. doi: 10.1177/036354658901700114
- Kapoor, M., Martel-Pelletier, J., Lajeunesse, D., Pelletier, J.-P., & Fahmi, H. (2011). Role of proinflammatory cytokines in the pathophysiology of osteoarthritis. *Nature Reviews Rheumatology*, 7(1), 33-42. doi: 10.1038/nrrheum.2010.196
- Katayama, K., Goto, K., Ishida, K., & Ogita, F. (2010). Substrate utilization during exercise and recovery at moderate altitude. *Metabolism*, 59(7), 959-966. doi: 10.1016/j.metabol.2009.10.017
- Kawakami, Y., Abe, T., & Fukunaga, T. (1993). Muscle-fiber pennation angles are greater in hypertrophied than in normal muscles. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 74(6), 2740-2744. doi: 10.1152/jappl.1993.74.6.2740
- Keays, S. L., Newcombe, P. A., Bullock-Saxton, J. E., Bullock, M. I., & Keays, A. C. (2010). Factors involved in the development of osteoarthritis after anterior cruciate ligament surgery. *The American Journal of Sports Medicine*, 38(3), 455-463. doi: 10.1177/0363546509350914
- Keefe, F. J., Blumenthal, J., Baucom, D., Affleck, G., Waugh, R., Caldwell, D. S., ... Lefebvre, J. (2004). Effects of spouse-assisted coping skills training and exercise training in patients with osteoarthritic knee pain : A randomized controlled study: *Pain*, 110(3), 539-549. doi: 10.1016/j.pain.2004.03.022
- Kjaer, M., Bangsbo, J., Lortie, G., & Galbo, H. (1988). Hormonal response to exercise in humans : influence of hypoxia and physical training. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 254(2), R197-R203. doi: 10.1152/ajpregu.1988.254.2.R197

- Knoop, J., Steultjens, M. P. M., van der Leeden, M., van der Esch, M., Thorstensson, C. A., Roorda, L. D., ... Dekker, J. (2011). Proprioception in knee osteoarthritis : a narrative review. *Osteoarthritis and Cartilage*, 19(4), 381-388. doi: 10.1016/j.joca.2011.01.003
- Kon, M., Ikeda, T., Homma, T., Akimoto, T., Suzuki, Y., & Kawahara, T. (2010). Effects of acute hypoxia on metabolic and hormonal responses to resistance exercise: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(7), 1279-1285. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181ce61a5
- Kujaník, S., Snincák, M., Vokál', J., Podracký, J., & Koval', J. (2000). Periodicity of arrhythmias in healthy elderly men at the moderate altitude. *Physiological Research*, 49(2), 285-287.
- 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. doi: 10.1111/cpf.12147
- Kuruganti, U., Parker, P., Rickards, J., & Tingley, M. (2006). Strength and muscle coactivation in older adults after lower limb strength training. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36(9), 761-766. doi: 10.1016/j.ergon.2006.05.006
- Laadhar, L., Zitouni, M., Kalle-Sellami, M., Mahjoub, M., Sellami, S., & Makni, S. (2007). Physiopathologie de l'arthrose. Du cartilage normal au cartilage arthrosique : facteurs de prédisposition et mécanismes inflammatoires. *La Revue de Médecine Interne*, 28(8), 531-536. doi: 10.1016/j.revmed.2007.01.012
- Lasevicius, T., Schoenfeld, B. J., Silva-Batista, C., Barros, T. de S., Aihara, A. Y., Brendon, H., ... Teixeira, E. L. (2019). Muscle failure promotes greater muscle hypertrophy in low-load but not in high-load resistance training: *Journal of Strength and Conditioning Research*, 1. doi: 10.1519/JSC.0000000000003454
- Lasevicius, T., Ugrinowitsch, C., Schoenfeld, B. J., Roschel, H., Tavares, L. D., De Souza, E. O., ... Tricoli, V. (2018). Effects of different intensities of resistance training with equated volume load on muscle strength and hypertrophy. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 772-780. doi: 10.1080/17461391.2018.1450898
- Laurentino, G. C., Ugrinowitsch, C., Roschel, H., Aoki, M. S., Soares, A. G., Neves, M., ... Tricoli, V. (2012). Strength training with blood flow restriction diminishes myostatin

gene expression: *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 44(3), 406-412. doi: 10.1249/MSS.0b013e318233b4bc

Lee, M. S., Pittler, M. H., & Ernst, E. (2008). Tai chi for osteoarthritis : a systematic review. *Clinical Rheumatology*, 27(2), 211-218. doi: 10.1007/s10067-007-0700-4

Levine, B. D., Zuckerman, J. H., & deFilippi, C. R. (1997). Effect of high-altitude exposure in the elderly : the tenth mountain division study. *Circulation*, 96(4), 1224-1232. doi: 10.1161/01.cir.96.4.1224

Lewis, C. L., Foley, H. D., Lee, T. S., & Berry, J. W. (2018). Hip-muscle activity in men and women during resisted side stepping with different band positions. *Journal of Athletic Training*, 53(11), 1071-1081. doi: 10.4085/1062-6050-46-16

Leys, T., Salmon, L., Waller, A., Linklater, J., & Pinczewski, L. (2012). Clinical results and risk factors for reinjury 15 years after anterior cruciate ligament reconstruction : a prospective study of hamstring and patellar tendon grafts. *The American Journal of Sports Medicine*, 40(3), 595-605. doi: 10.1177/0363546511430375

Liikavainio, T., Isolehto, J., Helminen, H. J., Perttunen, J., Lepola, V., Kiviranta, I., ... Komi, P. V. (2007). Loading and gait symmetry during level and stair walking in asymptomatic subjects with knee osteoarthritis : Importance of quadriceps femoris in reducing impact force during heel strike? *The Knee*, 14(3), 231-238. doi: 10.1016/j.knee.2007.03.001

Lin, D.-H., Lin, C.-H. J., Lin, Y.-F., & Jan, M.-H. (2009). Efficacy of 2 non-weight-bearing interventions, proprioception training versus strength training, for patients with knee osteoarthritis : a randomized clinical trial. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, 39(6), 450-457. doi: 10.2519/jospt.2009.2923

Lixandrão, M. E., Ugrinowitsch, C., Berton, R., Vechin, F. C., Conceição, M. S., Damas, F., ... Roschel, H. (2018). Magnitude of muscle strength and mass adaptations between high-load resistance training versus low-load resistance training associated with blood-flow restriction : a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 48(2), 361-378. doi: 10.1007/s40279-017-0795-y

Lockhart, C., Scott, B. R., Thoseby, B., & Dascombe, B. J. (2019). Acute effects of intersset rest duration on physiological and perceptual responses to resistance exercise in

hypoxia. *The Journal of Strength & Conditioning Research, Publish Ahead of Print*. doi: 10.1519/JSC.0000000000002755

Loenneke, J. P., Wilson, J. M., Wilson, G. J., Pujol, T. J., & Bembien, M. G. (2011). Potential safety issues with blood flow restriction training : safety of blood flow-restricted exercise. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 21(4), 510-518. doi: 10.1111/j.1600-0838.2010.01290.x

Loenneke, J. P., & Pujol, T. J. (2009). The use of occlusion training to produce muscle hypertrophy. *Strength & Conditioning Journal*, 31(3), 77-84. doi: 10.1519/ssc.0b013e3181a5a352

Loenneke, J. P., Wilson, J. M., Marín, P. J., Zourdos, M. C., & Bembien, M. G. (2012). Low intensity blood flow restriction training : a meta-analysis. *European Journal of Applied Physiology*, 112(5), 1849-1859. doi: 10.1007/s00421-011-2167-x

Manimmanakorn, A., Hamlin, M. J., Ross, J. J., Taylor, R., & Manimmanakorn, N. (2013a). Effects of low-load resistance training combined with blood flow restriction or hypoxia on muscle function and performance in netball athletes. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 16(4), 337-342. doi: 10.1016/j.jsams.2012.08.009

Manimmanakorn, A., Manimmanakorn, N., Taylor, R., Draper, N., Billaut, F., Shearman, J. P., & Hamlin, M. J. (2013b). Effects of resistance training combined with vascular occlusion or hypoxia on neuromuscular function in athletes. *European Journal of Applied Physiology*, 113(7), 1767-1774. doi: 10.1007/s00421-013-2605-z

Manson, J. E., Stampfer, M. J., Colditz, G. A., Willett, W. C., Rosner, B., Hennekens, C. H., ... Krolewski, A. S. (1991). Physical activity and incidence of non-insulin-dependent diabetes mellitus in women. *The Lancet*, 338(8770), 774-778. doi: 10.1016/0140-6736(91)90664-B

McAuley, E., & Rudolph, D. (1995). Physical activity, aging, and psychological well-being. *Journal of Aging and Physical Activity*, 3(1), 67-96. doi: 10.1123/japa.3.1.67

McCall, G. E., Byrnes, W. C., Dickinson, A., Pattany, P. M., & Fleck, S. J. (1996). Muscle fiber hypertrophy, hyperplasia, and capillary density in college men after resistance training. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 81(5), 2004-2012. doi: 10.1152/jappl.1996.81.5.2004

- McGoey, B., Deitel, M., Saplys, R., & Kliman, M. (1990). Effect of weight loss on musculoskeletal pain in the morbidly obese. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British volume*, 72-B(2), 322-323. doi: 10.1302/0301-620X.72B2.2138158
- McHugh, M. P., Connolly, D. A. J., Eston, R. G., & Gleim, G. W. (2000). Electromyographic analysis of exercise resulting in symptoms of muscle damage. *Journal of Sports Sciences*, 18(3), 163-172. doi: 10.1080/026404100365063
- McKinley, T. O., Tochigi, Y., Rudert, M. J., & Brown, T. D. (2008). The effect of incongruity and instability on contact stress directional gradients in human cadaveric ankles. *Osteoarthritis and Cartilage*, 16(11), 1363-1369. doi: 10.1016/j.joca.2008.04.005
- Meakins, A., & Cormack, B. (2020, 5 mars). Exercise dosing for pain is not the same as exercise dosing for fitness! Repéré à <https://www.betterclinicianproject.com/blog/exercise-dosing-for-pain-is-not-the-same-as-exercise-dosing-for-fitness>
- Melzer, I., Benjuya, N., & Kaplanski, J. (2001). Age-related changes of postural control : effect of cognitive tasks. *Gerontology*, 47(4), 189-194. doi: 10.1159/000052797
- Messier, S. P., Beavers, D. P., Mihalko, S. L., Miller, G. D., Lyles, M. F., Hunter, D. J., ... DeVita, P. (2020). The effects of intensive dietary weight loss and exercise on gait in overweight and obese adults with knee osteoarthritis. The Intensive Diet and Exercise for Arthritis (IDEA) trial. *Journal of Biomechanics*, 98, 109477. doi: 10.1016/j.jbiomech.2019.109477
- Messier, S. P., Gutekunst, D. J., Davis, C., & DeVita, P. (2005). Weight loss reduces knee-joint loads in overweight and obese older adults with knee osteoarthritis. *Arthritis & Rheumatism*, 52(7), 2026-2032. doi: 10.1002/art.21139
- Michael, J. W.-P., Schlüter-Brust, K. U., & Eysel, P. (2010). The epidemiology, etiology, diagnosis, and treatment of osteoarthritis of the knee. *Deutsches Arzteblatt International*, 107(9), 152-162. doi: 10.3238/arztebl.2010.0152
- Mikesky, A. E., Mazzuca, S. A., Brandt, K. D., Perkins, S. M., Damush, T., & Lane, K. A. (2006). Effects of strength training on the incidence and progression of knee osteoarthritis. *Arthritis Care & Research*, 55(5), 690-699. doi: 10.1002/art.22245

- Mikesky, A. E., Meyer, A., & Thompson, K. L. (2000). Relationship between quadriceps strength and rate of loading during gait in women. *Journal of Orthopaedic Research*, 18(2), 171-175. doi: 10.1002/jor.1100180202
- Millet, G. P., Debevec, T., Brocherie, F., Malatesta, D., & Girard, O. (2016). Therapeutic use of exercising in hypoxia : promises and limitations. *Frontiers in Physiology*, 7. doi: 10.3389/fphys.2016.00224
- Miyaguchi, M., Kobayashi, A., Kadoya, Y., Ohashi, H., Yamano, Y., & Takaoka, K. (2003). Biochemical change in joint fluid after isometric quadriceps exercise for patients with osteoarthritis of the knee. *Osteoarthritis and Cartilage*, 11(4), 252-259. doi: 10.1016/S1063-4584(02)00372-2
- Mohing, W. (1966). *Die Arthrosis deformans des Kniegelenkes : Ätiologie - Pathogenese - Klinik - Begutachtung*. New York: Springer-Verlag.
- Moritani, T., & deVries, H. A. (1979). Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *American Journal of Physical Medicine*, 58(3), 115-130.
- Moritani, T., Sherman, W. M., Shibata, M., Matsumoto, T., & Shinohara, M. (1992). Oxygen availability and motor unit activity in humans. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 64(6), 552-556. doi: 10.1007/bf00843767
- Nagai, K., Yamada, M., Uemura, K., Yamada, Y., Ichihashi, N., & Tsuboyama, T. (2011). Differences in muscle coactivation during postural control between healthy older and young adults. *Archives of Gerontology and Geriatrics*, 53(3), 338-343. doi: 10.1016/j.archger.2011.01.003
- Nakajima, T., Kurano, M., Iida, H., Takano, H., Oonuma, H., Morita, T., ... Group, K. T. (2006). Use and safety of kaatsu training: results of a national survey. *International Journal of KAATSU Training Research*, 2(1), 5-13. doi: 10.3806/ijktr.2.5
- Nardone, A., Romanò, C., & Schieppati, M. (1989). Selective recruitment of high-threshold human motor units during voluntary isotonic lengthening of active muscles. *The Journal of Physiology*, 409(1), 451-471. doi: 10.1113/jphysiol.1989.sp017507
- Naugle, K. M., Fillingim, R. B., & Riley, J. L. (2012). A meta-analytic review of the hypoalgesic effects of exercise. *The journal of pain : Official journal of the American Pain Society*, 13(12), 1139-1150. doi: 10.1016/j.jpain.2012.09.006

- Nielsen, J. L., Aagaard, P., Bech, R. D., Nygaard, T., Hvid, L. G., Wernbom, M., ... Frandsen, U. (2012). Proliferation of myogenic stem cells in human skeletal muscle in response to low-load resistance training with blood flow restriction. *The Journal of Physiology*, 590(17), 4351-4361. doi: 10.1113/jphysiol.2012.237008
- 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. doi: 10.1123/ijsp.5.4.497
- Nóbrega, S. R., Ugrinowitsch, C., Pintanel, L., Barcelos, C., & Libardi, C. A. (2018). Effect of resistance training to muscle failure vs. volitional interruption at high- and low-intensities on muscle mass and strength: *Journal of Strength and Conditioning Research*, 32(1), 162-169. doi: 10.1519/JSC.0000000000001787
- Nogueira, W., Gentil, P., Mello, S., Oliveira, R., Bezerra, A., & Bottaro, M. (2009). Effects of power training on muscle thickness of older men. *International Journal of Sports Medicine*, 30(03), 200-204. doi: 10.1055/s-0028-1104584
- Ohta, H., Kurosawa, H., Ikeda, H., Iwase, Y., Satou, N., & Nakamura, S. (2003). Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 74(1), 62-68. doi: 10.1080/00016470310013680
- Ohtori, S., Orita, S., Yamashita, M., Ishikawa, T., Ito, T., Shigemura, T., ... Takahashi, K. (2012). Existence of a neuropathic pain component in patients with osteoarthritis of the knee. *Yonsei Medical Journal*, 53(4), 801-805. doi: 10.3349/ymj.2012.53.4.801
- O'Reilly, S. C., Muir, K. R., & Doherty, M. (1999). Effectiveness of home exercise on pain and disability from osteoarthritis of the knee : a randomised controlled trial. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 58(1), 15-19. doi: 10.1136/ard.58.1.15
- Page, C. J., Hinman, R. S., & Bennell, K. L. (2011). Physiotherapy management of knee osteoarthritis : physiotherapy management of knee OA. *International Journal of Rheumatic Diseases*, 14(2), 145-151. doi: 10.1111/j.1756-185X.2011.01612.x
- Pamukoff, D. N., Dudley, R. I., Vakula, M. N., & Blackburn, J. T. (2016). An evaluation of the heel strike transient in obese young adults during walking gait. *Gait & Posture*, 49, 181-183. doi: 10.1016/j.gaitpost.2016.07.001

- Patterson, S. D., & Ferguson, R. A. (2011). Enhancing strength and postocclusive calf blood flow in older people with training with blood-flow restriction. *Journal of Aging and Physical Activity*, 19(3), 201-213.
- Patterson, S. D., Hughes, L., Warmington, S., Burr, J., Scott, B. R., Owens, J., ... Loenneke, J. (2019). Blood flow restriction exercise : considerations of methodology, application, and safety. *Frontiers in Physiology*, 10. doi: 10.3389/fphys.2019.00533
- Pelland, L., Brosseau, L., Wells, G., MacLeay, L., Lambert, J., Lamothe, C., ... Tugwell, P. (2004). Efficacy of strengthening exercises for osteoarthritis (Part I) : a meta-analysis. *Physical Therapy Reviews*, 9(2), 77-108. doi: 10.1179/108331904225005052
- Pendleton, A. (2000). EULAR recommendations for the management of knee osteoarthritis : report of a task force of the standing committee for international clinical studies including therapeutic trials (ESCISIT). *Annals of the Rheumatic Diseases*, 59(12), 936-944. doi: 10.1136/ard.59.12.936
- Penninx, B. W. J. H., Messier, S. P., Rejeski, W. J., Williamson, J. D., DiBari, M., Cavazzini, C., ... Pahor, M. (2001). Physical exercise and the prevention of disability in activities of daily living in older persons with osteoarthritis. *Archives of Internal Medicine*, 161(19), 2309-2316. doi: 10.1001/archinte.161.19.2309
- Penninx, B. W. J. H., Rejeski, W. J., Pandya, J., Miller, M. E., Di Bari, M., Applegate, W. B., & Pahor, M. (2002). Exercise and depressive symptoms: a comparison of aerobic and resistance exercise effects on emotional and physical function in older persons with high and low depressive symptomatology. *The Journals of Gerontology : Series B*, 57(2), P124-P132. doi: 10.1093/geronb/57.2.P124
- Phillips, S. M. (2000). Short-term training : when do repeated bouts of resistance exercise become training? *Canadian Journal of Applied Physiology*, 25(3), 185-193. doi: 10.1139/h00-014
- Pope, Z., Willardson, J., & Schoenfeld, B. (2013). Exercise and blood flow restriction. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27(10), 2914-2926. doi: 10.1519/JSC.0b013e3182874721
- Proske, U., & Morgan, D. L. (2001). Muscle damage from eccentric exercise: mechanism, mechanical signs, adaptation and clinical applications. *The Journal of Physiology*, 537(2), 333-345. doi: 10.1111/j.1469-7793.2001.00333.x

- Radin, E. L., Yang, K. H., Riegger, C., Kish, V. L., & O'Connor, J. J. (1991). Relationship between lower limb dynamics and knee joint pain. *Journal of Orthopaedic Research*, 9(3), 398-405. doi: 10.1002/jor.1100090312
- Ramos-Campo, D. J., Rubio-Arias, J. A., Dufour, S., Chung, L., Ávila-Gandía, V., & Alcaraz, P. E. (2017). Biochemical responses and physical performance during high-intensity resistance circuit training in hypoxia and normoxia. *European Journal of Applied Physiology*, 117(4), 809-818. doi: 10.1007/s00421-017-3571-7
- Ramos-Campo, D. J., Scott, B. R., Alcaraz, P. E., & Rubio-Arias, J. A. (2018). The efficacy of resistance training in hypoxia to enhance strength and muscle growth : a systematic review and meta-analysis. *European Journal of Sport Science*, 18(1), 92-103. doi: 10.1080/17461391.2017.1388850
- Reeves, G. V., Kraemer, R. R., Hollander, D. B., Clavier, J., Thomas, C., Francois, M., & Castracane, V. D. (2006). Comparison of hormone responses following light resistance exercise with partial vascular occlusion and moderately difficult resistance exercise without occlusion. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 101(6), 1616-1622. doi: 10.1152/japplphysiol.00440.2006
- Regnaux, J.-P., Lefevre-Colau, M.-M., Trinquart, L., Nguyen, C., Boutron, I., Brosseau, L., & Ravaud, P. (2015). High-intensity versus low-intensity physical activity or exercise in people with hip or knee osteoarthritis. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (10). doi: 10.1002/14651858.CD010203.pub2
- Robergs, R. A., Ghiasvand, F., & Parker, D. (2004). Biochemistry of exercise-induced metabolic acidosis. *American Journal of Physiology. Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 287(3), R502-516. doi: 10.1152/ajpregu.00114.2004
- Rodriguez, B. L., Curb, J. D., Burchfiel, C. M., Abbott, R. D., Petrovitch, H., Masaki, K., & Chiu, D. (1994). Physical activity and 23-year incidence of coronary heart disease morbidity and mortality among middle-aged men. *Circulation*, 89(6), 2540-2544. doi: 10.1161/01.CIR.89.6.2540
- Røgind, H., Bibow-Nielsen, B., Jensen, B., Møller, H. C., Frimodt-Møller, H., & Bliddal, H. (1998). The effects of a physical training program on patients with osteoarthritis of the knees. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 79(11), 1421-1427. doi: 10.1016/S0003-9993(98)90238-6

- Roubenoff, R. (2003). Exercise and inflammatory disease. *Arthritis Care & Research*, 49(2), 263-266. doi: 10.1002/art.11008
- Sale, D. G. (1988). Neural adaptation to resistance training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 20(5 Suppl), S135-145. doi: 10.1249/00005768-198810001-00009
- Sampson, J. A., & Groeller, H. (2016). Is repetition failure critical for the development of muscle hypertrophy and strength?: failure is not necessary for strength gain. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(4), 375-383. doi: 10.1111/sms.12445
- Samson, D. J., Grant, M. D., Ratko, T. A., Bonnell, C. J., Ziegler, K. M., & Aronson, N. (2007). Treatment of primary and secondary osteoarthritis of the knee. *Evidence Report/Technology Assessment*, 157.
- Schilke, J. M., Johnson, G. O., Housh, T. J., & O'Dell, J. R. (1996). Effects of muscle-strength training on the functional status of patients with osteoarthritis of the knee joint. *Nursing Research*, 45(2), 68.
- Schoenfeld, B. J. (2010). The Mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 24(10), 2857-2872. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181e840f3
- Schoenfeld, B. J. (2013). Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Medicine*, 43(3), 179-194. doi: 10.1007/s40279-013-0017-1
- Schoenfeld, B. J., Peterson, M. D., Ogborn, D., Contreras, B., & Sonmez, G. T. (2015). Effects of low- vs. high-load resistance training on muscle strength and hypertrophy in well-trained men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 29(10), 2954-2963. doi: 10.1519/JSC.0000000000000958
- Schoenfeld, B. J. & Grgic, J. (2019). Does training to failure maximize muscle hypertrophy? *Strength and Conditioning Journal*, 41(5), 108-113. doi: 10.1519/SSC.0000000000000473
- Scott, B. R., Loenneke, J. P., Slattery, K. M., & Dascombe, B. J. (2015). Exercise with blood flow restriction: an updated evidence-based approach for enhanced muscular development. *Sports Medicine*, 45(3), 313-325. doi: 10.1007/s40279-014-0288-1

- Scott, B. R., Slattery, K. M., & Dascombe, B. J. (2014a). Intermittent hypoxic resistance training: does it provide added benefit? *Frontiers in Physiology*, 5. doi: 10.3389/fphys.2014.00397
- Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V., & Dascombe, B. J. (2014b). Hypoxia and resistance exercise: a comparison of localized and systemic methods. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 44(8), 1037-1054. doi: 10.1007/s40279-014-0177-7
- Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V., & Dascombe, B. J. (2018a). Hypoxia during resistance exercise does not affect physical performance, perceptual responses, or neuromuscular recovery. *The Journal of Strength & Conditioning Research*, 32(8), 2174. doi: 10.1519/JSC.0000000000002304
- Scott, B. R., Slattery, K. M., Sculley, D. V., Smith, S. M., Peiffer, J. J., & Dascombe, B. J. (2018b). Acute physiological and perceptual responses to high-load resistance exercise in hypoxia. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, 38(4), 595-602. doi: 10.1111/cpf.12451
- Segal, N. A., Williams, G. N., Davis, M., Wallace, R. B., & Mikesky, A. (2015a). Efficacy of blood flow restricted low-load resistance training in women with risk factors for symptomatic knee osteoarthritis. *PM & R: the journal of injury, function, and rehabilitation*, 7(4), 376-384. doi: 10.1016/j.pmrj.2014.09.014
- Segal, N., Davis, M. D., & Mikesky, A. E. (2015b). Efficacy of blood flow-restricted low-load resistance training for quadriceps strengthening in men at risk of symptomatic knee osteoarthritis. *Geriatric Orthopaedic Surgery & Rehabilitation*, 6(3), 160-167. doi: 10.1177/2151458515583088
- Sharma, L. (1999). Proprioceptive impairment in knee osteoarthritis. *Rheumatic Diseases Clinics of North America*, 25(2), 299-314.
- Sharma, L., Pai, Y.-C., Holtkamp, K., & Rymer, W. Z. (1997). Is knee joint proprioception worse in the arthritic knee versus the unaffected knee in unilateral knee osteoarthritis? *Arthritis & Rheumatism*, 40(8), 1518-1525. doi: 10.1002/art.1780400821
- Sharma, M., McFarlane, C., Kambadur, R., Kukreti, H., Bonala, S., & Srinivasan, S. (2015). Myostatin: expanding horizons. *IUBMB life*, 67(8), 589-600. doi: 10.1002/iub.1392

- Singh, N. A., Clements, K. M., & Fiatarone, M. A. (1997). A randomized controlled trial of progressive resistance training in depressed elders. *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 52A(1), M27-M35. doi: 10.1093/gerona/52A.1.M27
- Slemenda, C., Brandt, K. D., Heilman, D., K., Mazzuca, S., Braunstein, E., M., Katz, B., P., & Wolinsky, F. D. (1997). Quadriceps weakness and osteoarthritis of the knee. *Annals of Internal Medicine*, 127(2), 97. doi: 10.7326/0003-4819-127-2-199707150-00001
- Staron, R. S., Leonardi, M. J., Karapondo, D. L., Malicky, E. S., Falkel, J. E., Hagerman, F. C., & Hikida, R. S. (1991). Strength and skeletal muscle adaptations in heavy-resistance-trained women after detraining and retraining. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 70(2), 631-640. doi: 10.1152/jappl.1991.70.2.631
- Stubbs, B., Koyanagi, A., Schuch, F. B., Firth, J., Rosenbaum, S., Veronese, N., ... Vancampfort, D. (2016). Physical activity and depression : a large cross-sectional, population-based study across 36 low- and middle-income countries. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 134(6), 546-556. doi: 10.1111/acps.12654
- 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. doi: 10.1152/japplphysiol.01460.2006
- Suga, T., Okita, K., Takada, S., Omokawa, M., Kadoguchi, T., Yokota, T., ... Tsutsui, H. (2012). Effect of multiple set on intramuscular metabolic stress during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction. *European Journal of Applied Physiology*, 112(11), 3915-3920. doi: 10.1007/s00421-012-2377-x
- Takarada, Y., Nakamura, Y., Aruga, S., Onda, T., Miyazaki, S., & Ishii, N. (2000a). Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *Journal of Applied Physiology*, 88(1), 61-65. doi: 10.1152/jappl.2000.88.1.61
- Takarada, Y., Takazawa, H., Sato, Y., Takebayashi, S., Tanaka, Y., & Ishii, N. (2000b). Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *Journal of Applied Physiology*, 88(6), 2097-2106. doi: 10.1152/jappl.2000.88.6.2097
- Tan, A. L., Toumi, H., Benjamin, M., Grainger, A. J., Tanner, S. F., Emery, P., & McGonagle, D. (2006). Combined high-resolution magnetic resonance imaging and

histological examination to explore the role of ligaments and tendons in the phenotypic expression of early hand osteoarthritis. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 65(10), 1267-1272. doi: 10.1136/ard.2005.050112

Tanimoto, M., Sanada, K., Yamamoto, K., Kawano, H., Gando, Y., Tabata, I., ... Miyachi, M. (2008). Effects of whole-body low-intensity resistance training with slow movement and tonic force generation on muscular size and strength in young men. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 22(6), 1926-1938. doi: 10.1519/JSC.0b013e318185f2b0

Toigo, M., & Boutellier, U. (2006). New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations. *European Journal of Applied Physiology*, 97(6), 643-663. doi: 10.1007/s00421-006-0238-1

Topp, R., Woolley, S., Hornyak, J., Khuder, S., & Kahaleh, B. (2002). The effect of dynamic versus isometric resistance training on pain and functioning among adults with osteoarthritis of the knee. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 83(9), 1187-1195. doi: 10.1053/apmr.2002.33988

Tsalatas, T., Spyropoulos, G., Sileloglou, P., Sideris, V., & Giakas, G. (2009). The Role of co-activation of agonist and antagonist muscles in neural adaptations of strength training. *Sport & Physical Education Volume 7*(2), 232-243.

Valencia-Flores, M., Rebollar, V., Santiago, V., Orea, A., Rodríguez, C., Resendiz, M., ... Bliwise, D. L. (2004). Prevalence of pulmonary hypertension and its association with respiratory disturbances in obese patients living at moderately high altitude. *International Journal of Obesity*, 28(9), 1174-1180. doi: 10.1038/sj.ijo.0802726

Van Baar, M. E., Dekker, J., Oostendorp, R. A., Bijl, D., Voorn, T. B., Lemmens, J. A., & Bijlsma, J. W. (1998). The effectiveness of exercise therapy in patients with osteoarthritis of the hip or knee: a randomized clinical trial. *The Journal of Rheumatology*, 25(12), 2432-2439.

Wernbom, M., Augustsson, J., & Thome, R. (2007). The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Medicine*, 37(3), 225-264. doi: 10.2165/00007256-200737030-00004

Wernbom, M., Järrebring, R., Andreasson, M. A., & Augustsson, J. (2009). Acute effects of blood flow restriction on muscle activity and endurance during fatiguing dynamic knee

extensions at low load. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 23(8), 2389-2395. doi: 10.1519/JSC.0b013e3181bc1c2a

Willardson, J. (2006). A brief review: factors affecting the length of the rest interval between resistance exercise sets. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 20(4), 978-984.

Yan, B., Lai, X., Yi, L., Wang, Y., & Hu, Y. (2016). Effects of five-week resistance training in hypoxia on hormones and muscle strength. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 184-193. doi: 10.1519/JSC.0000000000001056

Yasuda, T., Brechue, W. F., Fujita, T., Shirakawa, J., Sato, Y., & Abe, T. (2009). Muscle activation during low-intensity muscle contractions with restricted blood flow. *Journal of Sports Sciences*, 27(5), 479-489. doi: 10.1080/02640410802626567

Yasuda, T., Fujita, S., Ogasawara, R., Sato, Y., & Abe, T. (2010). Effects of low-intensity bench press training with restricted arm muscle blood flow on chest muscle hypertrophy : a pilot study: bench press training with blood flow restriction. *Clinical Physiology and Functional Imaging*, no-no. doi: 10.1111/j.1475-097X.2010.00949.x

Yokokawa, Y., Hongo, M., Urayama, H., Nishimura, T., & Kai, I. (2008). Effects of low-intensity resistance exercise with vascular occlusion on physical function in healthy elderly people. *BioScience Trends*, 7.

Zhang, S.-L., Liu, H.-Q., Xu, X.-Z., Zhi, J., Geng, J.-J., & Chen, J. (2013). Effects of exercise therapy on knee joint function and synovial fluid cytokine levels in patients with knee osteoarthritis. *Molecular Medicine Reports*, 7(1), 183-186. doi: 10.3892/mmr.2012.1168

Zhang, W., Nuki, G., Moskowitz, R. W., Abramson, S., Altman, R. D., Arden, N. K., ... Tugwell, P. (2010). OARSI recommendations for the management of hip and knee osteoarthritis. *Osteoarthritis and Cartilage*, 18(4), 476-499. doi: 10.1016/j.joca.2010.01.013

Zourdos, M. C., Klemp, A., Dolan, C., Quiles, J. M., Schau, K. A., Jo, E., ... Blanco, R. (2016). Novel resistance training-specific rating of perceived exertion scale measuring repetitions in reserve. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 30(1), 267-275. doi: 10.1519/JSC.0000000000001049

Liste des illustrations

Figure 1 : Récapitulatif de la physiopathologie de l'arthrose	1
Figure 2 : Récapitulatif des mécanismes conduisant à une diminution de la douleur par l'exercice physique	3
Figure 3 : Rôles relatifs des adaptations neurales et musculaires lors d'un entraînement de force	4
Figure 4 : Tableau décisionnel simplifié sur les stratégies d'utilisation du BFR	6
Figure 5 : Interactions théoriques entre la force, l'hypertrophie et les adaptations neurales pour l'entraînement classique vs entraînement sous BFR	7
Figure 6 : Première phase de test en conditions hypoxiques	12
Figure 7 : Résultats intermédiaires à la suite des diverses rencontres avec les experts	14
Figure 8 : Protocole d'entraînement de force pour le membre inférieur sous BFR ou en hypoxie normobarique	15
Figure 9 : Exécution du squat avec occlusion du membre inférieur	16
Figure 10 : Exécution du pont fessier avec occlusion du membre inférieur	16
Figure 11 : Exécution de la fente avant avec occlusion du membre inférieur	17
Figure 12 : Exécution du pas latéral résisté avec occlusion du membre inférieur	18
Figure 13 : Mots clés utilisés durant le processus de recherche littéraire	XLIII
Figure 14 : Échelle expérimentale de l'évaluation de l'effort perçu en fonction de l'exercice de renforcement	LI

Annexes

Annexe 1

Facteurs de risque

La majorité de la population affectée reste la personne âgée. Nous savons désormais que l'âge est un des principaux facteurs de risque pour le développement de cette pathologie (Garstang & Stitik, 2006). On peut les dissocier en deux catégories. Premièrement, les facteurs de risque systémiques, ou endogènes, qui sont directement liés avec le développement de la gonarthrose. Ceux-ci comprennent l'ethnie, l'âge, le genre et le statut hormonal, la génétique, la densité osseuse et les facteurs nutritionnels. Secondement, les facteurs de risque biomécaniques locaux, ou exogènes, qui résultent de la fonction anormale de l'articulation. On inclut dans cette catégorie les traumatismes, le surpoids, la sursollicitation, l'activité physique ou sportive, la biomécanique de l'articulation, la faiblesse musculaire et la qualité de vie (Garstang & Stitik, 2006; Michael et al., 2010).

Classification de l'arthrose

On peut classer l'arthrose en deux catégories. L'arthrose primaire, également appelée idiopathique, qui peut être décrite comme un processus de dégénération articulaire sans anomalie sous-jacente. Autrement dit, la survenue de cette pathologie est inconnue et inexpliquée, il n'y a aucune cause légitime. L'arthrose secondaire, quant à elle, résulte d'une cause primaire. Elle apparaît suite à un traumatisme, à une sursollicitation, à des pathologies congénitales ou à des affections métaboliques ou endocriniennes (Samson et al., 2007).

Physiopathologie de l'arthrose

Concernant la physiopathologie, il faut tout d'abord noter que l'arthrose n'affecte pas uniquement le cartilage. Cette pathologie inclut l'ensemble des structures formant l'articulation, c'est-à-dire le cartilage articulaire, l'os sous-chondral, les tissus synoviaux, les ligaments, la capsule articulaire, les nerfs et les muscles péri-articulaires (Brandt et al., 2006).

Dans le premier stade de l'arthrose, on peut observer une détérioration du cartilage. Ce dernier n'est ni vascularisé, ni innervé. Sain, le cartilage est blanc et légèrement

translucide. En revanche, il brunit et disparaît progressivement lorsqu'il se dégrade. Au niveau histologique, il se compose uniquement de chondrocytes. Puis, suite à la progression de la pathologie, il devient fibrillaire et développe des irrégularités dans les zones cartilagineuses. Lors d'un stade plus avancé, la dégénération osseuse commence et des ostéophytes se forment (Laadhar et al., 2007).

Les altérations sous chondrales proviennent de microfractures à répétition dues à une charge excessive. Dans une articulation saine, le cartilage joue le rôle d'amortisseur grâce à ses capacités de résistance et son élasticité. Dans le cas d'une articulation arthrosique, ce dernier n'est plus fonctionnel. Ces microfractures cicatrisent donc grâce à une formation calleuse anormale pour l'articulation, que l'on nomme ostéophyte. Ces dégénération osseuses peuvent par conséquent limiter la mobilité articulaire et réduire la capacité d'absorption des chocs de l'articulation (Garstang & Stitik, 2006; Laadhar et al., 2007).

Implication des structures péri-articulaires

Concernant l'implication des structures péri-articulaires dans le développement de l'arthrose, commençons par nous intéresser aux ligaments. Tan et al. (2006) ont prouvé l'influence des ligaments collatéraux des articulations interphalangiennes sur l'érosion et l'œdème osseux dans l'arthrose. Les auteurs ont conclu que le rôle des ligaments dans la pathogenèse de l'arthrose atraumatique méritait d'être investigué. De plus, nous savons désormais qu'une articulation souffrant d'une instabilité ligamentaire développe plus rapidement de l'arthrose (Blalock et al., 2015). McKinley et al. (2008) ont démontré pour l'articulation de la cheville qu'une instabilité articulaire augmentait considérablement le stress de contact lié à l'incongruence des surfaces articulaires. Il serait donc légitime d'émettre l'hypothèse qu'un phénomène identique est à observer pour l'articulation du genou. Une étude s'est également penchée sur les liens entre la mécanique d'un genou instable et le développement de l'arthrose. Les résultats de cette dernière suggèrent qu'une instabilité mènerait à une contrainte articulaire présentant un contact articulaire altéré et une plus grande zone d'exposition, ceci pouvant causer une lésion du cartilage articulaire (Farrokhi et al., 2014). Kannus (1988; 1989) a lui aussi démontré que les lésions des ligaments collatéraux médial et latéral étaient un facteur de risque pour l'arthrose du genou.

Outre l'instabilité articulaire, la faiblesse des muscles péri-articulaires peut également mener à une gonarthrose (Hurley, 1999; Slemenda et al., 1997). Il a été démontré que le quadriceps est responsable de la stabilité du genou dans le plan sagittal (Johansson et al., 1991). La dynapénie quadricipitale est fréquente chez les patients souffrant d'arthrose du genou, cela est d'ailleurs souvent considéré comme une conséquence de la douleur apparaissant à la charge. Cette douleur pousse les patients à se limiter dans leurs activités, afin de minimiser la charge. On entre alors dans un cercle vicieux menant à l'amyotrophie. En plus d'être une conséquence à la douleur, le manque de force du quadriceps est également un facteur de risque pour le développement de l'arthrose (Slemenda et al., 1997).

Une étude a pu démontrer que des petites charges inattendues pour lesquelles l'articulation n'était pas préparée étaient beaucoup plus dommageables que des grosses charges qui avaient été anticipées (Jones & Watt, 1971). On en déduit donc qu'une atrophie musculaire associée à une vitesse de conduction nerveuse ralentie réduit l'efficacité des mécanismes amortisseurs de la marche. C'est-à-dire qu'une personne lambda souffrant de légères incoordinations subit à chaque pas des microtraumatismes au niveau du cartilage et de l'os sous chondral (Jefferson et al., 1990).

Le système nerveux peut également être inclus dans la pathologie de l'arthrose. En effet, nous savons que la proprioception diminue avec l'âge et dans les articulations arthrosiques (Sharma, 1999). En outre, Sharma et al. (1997) ont également prouvé que les patients souffrant de gonarthrose unilatérale, tant sur le plan radiographique que clinique, démontraient une diminution bilatérale de la proprioception. Cette découverte émet l'hypothèse qu'une déficience neurologique pourrait être la cause de la survenue d'arthrose et non pas simplement une conséquence. Une autre étude réalisée par Ohtori et al. (2012) a investigué l'existence d'une composante neuropathique dans la gonarthrose. Il s'est avéré que sur 92 patients souffrant d'arthrose du genou, 5,4% souffraient probablement de douleurs d'origine neuropathique. Cette étude nous dit qu'il est possible que la douleur neuropathique apparaisse conjointement à une lésion des nerfs innervant l'os sous chondral. En effet, dans les stades avancés de l'arthrose, on observe une diminution de la synovie et une destruction osseuse, ceci induisant une lésion des structures nerveuses adjacentes. Il est donc important de considérer l'existence de composantes neuropathiques dans le développement et dans le traitement de l'arthrose.

Annexe 2

Traitement de l'arthrose

Traitement conservateur

L'objectif du traitement conservateur est d'augmenter la stabilité articulaire, d'améliorer la fonction, de diminuer les douleurs et de prévenir la progression de la pathologie. La physiothérapie a pour but de restaurer la stabilité via le renforcement des muscles péri-articulaires et l'amélioration de la proprioception. Les activités physiques à faible impact, telles que la natation et le cyclisme sont excellentes pour tonifier la musculature tout en respectant la symptomatique du genou lésé. Un autre axe du traitement conservateur est la médication. Les anti-inflammatoires non stéroïdiens et les injections intra-articulaires ont prouvé leurs bienfaits dans la diminution de la symptomatique, mais sont inefficaces contre le ralentissement de la progression de la pathologie (Blalock et al., 2015).

Traitement chirurgical

Le traitement chirurgical comprend différentes interventions comme, entre autres, les reconstructions ligamentaires et méniscales, les ostéotomies correctives, la prothèse ou encore les arthrodèses. La reconstruction ligamentaire a pour but de restaurer la stabilité articulaire pré-traumatique et donc de prévenir l'articulation d'une blessure récidivante. Or, bien que l'efficacité de cette intervention en termes de satisfaction du patient, des symptômes, de la fonction, du niveau d'activité et de la stabilité ait été prouvée, il n'a pas été démontré qu'elle diminue le taux de développement d'arthrose (Keays et al., 2010; Leys et al., 2012). La prise en charge chirurgicale précoce joue un rôle important dans la réduction de la douleur et de l'instabilité. L'ostéotomie corrective est utilisée pour réaligner l'axe de la jambe et réduire les forces de cisaillement. Lorsque l'arthrose est trop sévère, on procède alors au remplacement de l'articulation. La prothèse totale de genou (PTG) est un traitement extrêmement efficace pour des arthroses avancées. L'arthrodèse est également à envisager dans ces cas. Cependant, la fixation définitive de l'articulation pose un problème de mobilité et accroît le stress sur les articulations sus- et sous-jacente. En tenant compte des implications à long terme de ce traitement et du fait que l'arthrose post-traumatique affecte souvent des patients plus jeunes, il est à concevoir que la PTG et l'arthrodèse ne sont pas les traitements idéaux pour ce type de patients. Il faut donc évaluer les options à choix et peut-être se focaliser plutôt sur des stratégies et

une gestion plus efficaces de la stabilité du genou et sur la prévention de la pathologie (Blalock et al., 2015).

Annexe 3

Mécanismes conduisant à une diminution de la douleur par l'exercice physique

Dans la première catégorie, soit les composantes neuromusculaires, les mécanismes menant à une réduction de la douleur sont principalement liés à une diminution du pic de charge mécanique sur le cartilage grâce aux exercices. En effet, Mikesky et al. (2006) ont démontré que la force de contraction des muscles péri-articulaires était un facteur important contribuant à la qualité du cartilage. Une autre étude a suggéré qu'améliorer la force musculaire à travers des exercices de renforcement permettait une plus grande capacité d'activité physique, ce qui menait à une amélioration fonctionnelle du genou arthrosique (Røgind et al., 1998). Toujours quant à la force, Chang et al. (2005) ont observé qu'une bonne stabilité lors de la phase d'abduction de hanche durant la marche avait un effet protecteur contre le développement de l'arthrose du compartiment médial ipsilatéral.

Grâce à l'exercice physique, on peut également observer un effet sur la proprioception, l'équilibre et l'apprentissage moteur. La proprioception est définie comme une perception consciente ou inconsciente de la position et du mouvement d'une extrémité ou d'un espace articulaire. Elle dérive de l'intégration des signaux afférents des récepteurs proprioceptifs dans les différentes structures adjacentes. Elle est également influencée par des signaux extérieurs à l'articulation comme les systèmes vestibulaire, cutané et visuel par exemple (Knoop et al., 2011). Hutton et Atwater (1992) ont suggéré que le travail de force augmentait la sensibilité des structures sensori-motrices du quadriceps incluant les faisceaux musculaires et les organes de Golgi. Les bénéfices de l'exercice physique sur les spasmes musculaires, qui sont une source de douleurs et de handicap fonctionnel, sont également à prendre en compte dans le phénomène de réduction de la douleur (van Baar et al., 1998). De plus, Miyaguchi et al. (2003) ont énoncé que la stimulation des récepteurs proprioceptifs augmentait la stabilité articulaire, ce qui participe potentiellement à une amélioration de la symptomatologie de la gonarthrose.

Un moyen différent pour soulager l'articulation du genou consisterait à diminuer la co-contraction musculaire, c'est-à-dire la contraction simultanée d'un agoniste et de son antagoniste. Cette dernière augmente chez la personne âgée lors du contrôle postural statique ou dynamique (Hortobágyi et al., 2009; Iwamoto et al., 2017; Nagai et al., 2011). Cependant, plusieurs études n'ont trouvé qu'un changement limité dans la co-contraction agoniste-antagoniste chez le sujet âgé à la suite d'un entraînement de force, et ce malgré

des gains de force constatés (Kuruganti et al., 2006; Tsalatas et al., 2009). Il semblerait en outre que la personne âgée se serve de la co-activation musculaire comme une stratégie visant à améliorer la stabilité, par un raidissement des articulations (Melzer et al., 2001).

Un autre mécanisme atténuant la douleur est la capacité d'absorption des chocs. Selon l'étude de Cochrane et al. (2005), l'os sous-chondral n'est pas la seule structure responsable de l'absorption des chocs. La proprioception et le travail musculaire et tendineux durant la phase excentrique du quadriceps participent également à ce phénomène de diminution de l'impact. De plus, les extenseurs du genou limitent également l'impact lors de la phase d'attaque du talon à la marche (Jefferson et al., 1990). Baker et al. (2001) ont déclaré que des muscles plus forts pouvaient absorber plus d'énergie qui, sans cela, serait transmise dans l'articulation.

Dans la thématique de l'absorption des chocs, le terme « heel strike transient » (HST) est souvent mentionné. Ce dernier se réfère à un pic de charge rapide suivant directement la phase de contact avec le sol. C'est un indicateur d'une charge anormalement élevée à la marche. Le HST pourrait fournir une méthode dichotomique pour identifier les individus avec des charges trop hautes à la marche (Pamukoff et al., 2016). D'autre part, Mikesky et al. (2000) ont étudié la relation entre la force quadricipitale et le taux de charge durant la marche chez la femme. Ces derniers ont observé une diminution de la charge à la marche, du HST et des douleurs au genou chez les femmes suivant un entraînement en force. De plus, le contrôle du quadriceps, et plus particulièrement du vaste médial, est potentiellement un facteur important concernant la réduction des charges au niveau du genou arthrosique asymptomatique (Liikavainio et al., 2007).

L'amélioration de la stabilité articulaire est également une explication concernant les bénéfices de l'exercice dans la symptomatologie de cette pathologie (Jan & Lai, 1991; Keefe et al., 2004; Lee et al., 2008; Pelland et al., 2004; Schilke et al., 1996). Baker et al. (2001) ont révélé que des dysbalances et faiblesses musculaires pouvaient surcharger certains compartiments et que, par conséquent, l'exercice permettait de redistribuer équitablement les forces dans l'articulation. Huang et al. disent, dans leurs études, que l'augmentation de la force des fléchisseurs et des extenseurs du genou améliorent la stabilité chez le patient arthrosique (2005) et que, dès lors, la détérioration articulaire peut être prévenue (2003).

Concernant les composantes péri-articulaires, l'effet de l'exercice sur la minéralisation osseuse pourrait expliquer une diminution de la douleur selon Pelland et al. (2004). Pour

Cochrane et al. (2005) et Penninx et al. (2002) l'amélioration des symptômes de la gonarthrose peut également être accordée à des changements osseux, cependant ces derniers restent pour l'instant encore flous. Plusieurs auteurs suggèrent également que l'effet de l'exercice sur la symptomatologie vient de la modulation du cartilage (Cochrane et al., 2005). Toujours selon l'étude de Cochrane et al. (2005), de faibles niveaux de tensions ont des effets anti-inflammatoires et activent les voies anaboliques. En outre, une étude a découvert que l'inflammation chronique induisait une amyotrophie et participait, par ce biais, aux dommages articulaires. Les auteurs en ont conclu que l'exercice pouvait inverser ces effets sur l'inflammation chronique. Il est toutefois à noter que cette étude n'a investigué que l'arthrite rhumatoïde (Roubenoff, 2003). On peut malgré tout émettre l'hypothèse que des effets identiques pourraient être observés dans la pathologie de l'arthrose.

Parlons maintenant de la synovie, le cartilage est avasculaire et nourri par le liquide synovial (Laadhar et al., 2007). Un mouvement de compression, puis décompression du cartilage, qui est aisément observé lors d'exercices physiques, simule une pompe mécanique pour ce liquide et favorise donc son développement, ce qui est optimal pour la nutrition du cartilage (Cochrane et al., 2005). Miyaguchi et al. (2003) ont déclaré que l'exercice augmentait la viscosité du liquide synovial, ce qui lubrifierait l'articulation et, par conséquent, contribuerait à une diminution de la douleur.

En ce qui concerne les capacités physiques et la santé générale, Penninx et al. (2001) ont suggéré que l'influence positive de l'exercice physique chez les patients souffrant d'arthrose du genou pouvait en partie être expliquée par ses bénéfices collatéraux sur d'autres composantes, par exemple sur le système cardiovasculaire (Rodriguez et al., 1994), sur le diabète (Manson et al., 1991) ou encore sur l'ostéoporose (Heinonen et al., 1996).

Plusieurs études ont également cité la perte de poids comme facteur important pouvant expliquer la réduction de la symptomatologie des patients arthrosiques grâce à l'exercice physique (Lee et al., 2008; O'Reilly et al., 1999; Pelland et al., 2004; Penninx et al., 2001). D'autant plus que McGoey et al. (1990) avaient déjà prouvé avec leurs résultats que la perte de poids ralentissait la progression de l'arthrose dégénérative. Messier et al. (2005) explicitent même le fait que pour chaque pound perdu, cela résultera en une réduction de quatre fois la charge exercée sur le genou par pas durant les activités quotidiennes. Plus récemment, ce même auteur a comparé les effets d'une diète, des

exercices physiques et de ces deux modalités sur la diminution de la charge. Il en est arrivé à la conclusion que la diète seule diminuait de manière plus significative les charges au niveau de la hanche, du genou et de la cheville (Messier et al., 2020).

Enfin, pour les composantes psychosociales, nombre d'auteurs considèrent que l'exercice influence la symptomatologie à travers l'amélioration du bien-être (O'Reilly et al., 1999; Pelland et al., 2004; Røgind et al., 1998). Dans l'étude de Pelland et al. (2004), il a été démontré que l'exercice physique a un effet positif sur la qualité de vie. Cette étude se réfère à celle de Börjesson et al. (1996) qui appuie le fait qu'un tel effet pourrait indirectement réduire la douleur. Une autre recherche affirme d'ailleurs qu'une réduction de la douleur perçue par le patient lui-même pourrait mener à une amélioration de la santé mentale (O'Reilly et al., 1999). Dans la même idée, McAuley et Rudolph (1995) sont arrivés à la conclusion que l'activité physique était associée à un bien-être psychologique. De plus, Singh et al. (1997) ont observé une réduction significative des symptômes de la dépression après un programme d'entraînement chez des personnes de 65 ans ou plus. Stubbs et al. (2016) vont dans le même sens avec leur étude sur une large population, en trouvant une prévalence plus élevée d'une faible activité physique chez les personnes souffrant de dépression.

Hartman et al. (2000) attestent que l'exercice augmente l'auto-efficacité. L'auto-efficacité peut être décrite comme la croyance qu'a un individu en sa capacité de réaliser une tâche (Bandura, 1982). Il y a, par conséquent, de grandes probabilités que des patients avec une faible auto-efficacité évitent de pratiquer une activité physique (Bandura, 1977). En effet, la présence de peur, de stress et d'anxiété suite à une diminution des capacités physiques affecterait la fonction articulaire. De plus, une mauvaise gestion de la douleur et des fluctuations d'humeur correspondent à une réduction de la capacité fonctionnelle perçue. Afin d'augmenter l'auto-efficacité, il est également recommandé, entre autres, d'identifier et de renforcer les succès et accomplissements du patient, de faire des retours positifs sur sa performance, de l'aider à adopter des nouveaux comportements favorables et d'abandonner ceux qui lui sont néfastes (Allegrante & Marks, 2003).

Bien sûr, dans les composantes psychosociales, nous trouvons également l'effet placebo. En effet, Hinman et al. (2007) ont mentionné l'importance qu'avait cet effet, lors de la pratique d'une activité physique, dans les mécanismes de réduction de la douleur chez le patient arthrosique.

Un dernier élément primordial dont il faut tenir compte dans la réduction de la douleur est l'effet de l'exercice sur les cytokines pro-inflammatoires. Ce sont des molécules inflammatoires impliquées dans les processus dégénératifs de la pathologie de l'arthrose, notamment dans le catabolisme des tissus articulaires (Kapoor et al., 2011). En effet, une étude de Zhang et al. (2013) révèle que le taux des cytokines TNF- α (tumor necrosis factor- α), de hs-CRP (high sensitivity C-reactive protein) et de MMP-3 (matrix metalloproteinase-3) a significativement diminué suite à un entraînement musculaire et a par conséquent amélioré la fonction articulaire. Les auteurs concluent que la réduction de concentration de ces protéines inhiberait les dommages inflammatoires sur les chondrocytes ainsi que sur la matrice cartilagineuse.

Annexe 4

Mécanisme d'adaptation du BFR

Un des mécanismes pouvant expliquer ces gains résiderait dans le recrutement préférentiel des UM rapides dû aux conditions hypoxiques locales (Pope et al., 2013). Par électromyogramme intramusculaire, Moritani et al. (1992) ont pu prouver le recrutement des UM de type rapide de manière plus conséquente avec l'occlusion que sans. En mesurant l'activité musculaire par EMG, Takarada et al. (2000b) et Yasuda et al. (2009) abondent dans le même sens, les activités EMG étant plus importantes lors d'entraînement LI-BFR, par rapport à de la haute intensité sans occlusion. Cependant, certains autres travaux ne constatent aucun changement dans l'activité EMG avec ou sans occlusion, malgré une hypertrophie musculaire (Kacin & Strazar, 2011; Wernbom et al., 2009). Cela démontre que même si c'en est un, le recrutement musculaire n'est pas le seul facteur expliquant les gains liés à la restriction du flux sanguin (Pope et al., 2013).

Une autre hypothèse réside dans la réponse métabolique exagérée au stress ischémique et hypoxique provoqué par l'occlusion. En effet, plusieurs études ont observé une augmentation de la lactatémie lors d'entraînement LI-BFR (Reeves et al., 2006; Takarada et al., 2000a), signe indirect d'une demande métabolique plus importante (Robergs et al., 2004). Une baisse du pH sanguin lors d'entraînement LI-BFR a également été démontrée (Suga et al., 2012). Le milieu intracellulaire est donc plus acide, car les cations d'hydrogène s'accumulent à cause du retour veineux diminué (Pope et al., 2013). On sait également que l'hormone de croissance est sécrétée de manière plus abondante en milieu acide (Takarada et al., 2000a). Cette hormone qui favorise la construction de masse musculaire est donc présente en plus grande concentration lorsque le flux sanguin est réduit (Abe et al., 2006; Reeves et al., 2006; Takarada et al., 2000a).

Dans le même temps, les dommages musculaires induits par l'occlusion sanguine ont été investigués. Les changements de concentration sanguine d'interleukin-6 (IL-6), une cytokine intervenant dans la phase aiguë de l'inflammation, et de créatine kinase (CK), une enzyme libérée lors de lésions tissulaires ont été observés. La concentration d'IL-6 augmente très peu lors de l'entraînement LI-BFR par rapport à l'entraînement de force classique (Takarada et al., 2000a). De plus, aucun changement dans la CK n'a été observé entre l'entraînement de force avec des charges lourdes et l'entraînement LI-BFR (Abe et al., 2006; Takarada et al., 2000a). Il n'y a donc que très peu de dommage musculaire induit par cette pratique.

D'autres chercheurs se sont intéressés à la myostatine, une protéine qui inhibe la myogenèse, à savoir la croissance et la différenciation des cellules musculaires (Sharma et al., 2015). La diminution de ce facteur de croissance favorise donc l'hypertrophie musculaire. En réalisant une biopsie musculaire, Laurentino et al. (2012) ont trouvé des niveaux d'expression de myostatine similaires entre les groupes réalisant un entraînement LI-BFR et le groupe réalisant un entraînement classique de force à 80% de 1-RM. Ce résultat était associé avec une hypertrophie musculaire similaire dans les deux cas.

Une dernière hypothèse pouvant expliquer les gains hypertrophiques résultant de l'entraînement LI-BFR repose sur la prolifération des cellules satellites et l'augmentation du nombre de noyaux par fibre musculaire (Nielsen et al., 2012). En effet, l'augmentation du nombre de ces cellules indifférenciées et leur fusion avec les fibres musculaires favoriseraient l'hypertrophie musculaire (Dangott et al., 2000).

Enfin, certains auteurs ont également observé une hypertrophie dans les muscles en amont de l'occlusion et dans les muscles du tronc lors d'entraînement LI-BFR (Abe et al., 2012; Yasuda et al., 2010).

Annexe 5

Mécanismes d'adaptation en hypoxie

Comme pour le BFR, il semblerait que la réponse métabolique due aux conditions hypoxiques soit également à l'origine de l'hypertrophie musculaire et du gain de force observé (Ramos-Campo et al., 2017; Schoenfeld, 2013). L'hormone de croissance serait en effet sécrétée en quantité plus importante lors d'exercice en hypoxie par rapport à des conditions normoxiques (Kjaer et al., 1988; Kon et al., 2010; Kurobe et al., 2015). La sécrétion de l'hormone de croissance, directement responsable de l'hypertrophie musculaire, dépend cependant de l'altitude. Elle augmente au-delà de 3000m d'altitude (Kjaer et al., 1988; Kon et al., 2010), mais pas entre 2000m et 3000m (Katayama et al., 2010).

Yan et al. (2016) ont trouvé un gain de force associé à cette sécrétion plus importante de GH, contrairement à Kurobe et al. (2015), pour qui la force était similaire entre les deux conditions malgré une production de GH supérieure dans le groupe hypoxique. Quoiqu'il en soit, Ramos-Campo et al. (2018) arrivent à la conclusion dans sa revue systématique et méta-analyse que l'entraînement de force en hypoxie produit des gains hypertrophiques et de force significatifs, bien qu'ils ne soient pas forcément supérieurs à ceux induits par l'entraînement en normoxie. Il explique ces résultats par les différentes conditions employées dans les études analysées, notamment l'altitude choisie, le type de participants recrutés ou encore la structure d'entraînement utilisée.

Annexe 6

Thèmes de la recherche	Mots clés
Arthrose	« <i>knee osteoarthritis</i> », « <i>pathophysiology</i> », « <i>risk factors</i> », « <i>classification</i> », « <i>epidemiology</i> », « <i>instability</i> », « <i>cartilage disease</i> », « <i>heel strike</i> », « <i>proprioception</i> », « <i>knee pain</i> », « <i>elderly</i> », « <i>age related</i> »,
Programme standard de réhabilitation pour l'arthrose	« <i>knee osteoarthritis</i> », « <i>standard rehabilitation program</i> », « <i>resistance exercise</i> »
Traitements de l'arthrose	« <i>knee osteoarthritis</i> », « <i>treatment</i> », « <i>physiotherapy</i> », « <i>surgical</i> », « <i>non surgical</i> », « <i>conservatively</i> », « <i>therapy</i> »,
Mécanismes conduisant à une diminution de la douleur par l'exercice physique	« <i>knee osteoarthritis</i> », « <i>pain reduction</i> », « <i>exercise</i> », « <i>mechanisms</i> », « <i>cytokine</i> », « <i>pain</i> », « <i>disability</i> », « <i>physical activity</i> », « <i>self-efficacy</i> », « <i>coactivation</i> », « <i>weight loss</i> »,
Généralités de l'entraînement de force	« <i>strength training</i> », « <i>hypertrophy</i> », « <i>muscle strength</i> », « <i>recommendation</i> », « <i>training load</i> », « <i>volume</i> », « <i>frequency</i> », « <i>low intensity resistance training</i> », « <i>excentric</i> », « <i>time unde tension</i> », « <i>failure</i> », « <i>elderly</i> », « <i>intensity</i> »
BFR	« <i>blood flow restriction</i> », « <i>Kaatsu training</i> », « <i>occlusion</i> », « <i>elderly</i> », « <i>strength</i> », « <i>low intensity resistance training</i> », « <i>hypertrophy</i> », « <i>training</i> », « <i>damage</i> »,
Hypoxie	« <i>hypoxia</i> », « <i>altitude</i> », « <i>strength</i> », « <i>hypertrophy</i> », « <i>training</i> », « <i>normobaric</i> », « <i>metabolic stress</i> », « <i>hormonal response</i> », « <i>therapeutic use</i> »,

Figure 13 : Mots clés utilisés durant le processus de recherche littéraire, Darbellay & Fardel (2020)

Annexe 7

Première phase : test en conditions hypoxiques

En premier lieu, nous avons convenu d'une rencontre avec nos experts ExPT, ExH et ExRC à la clinique romande de réadaptation (CRR) pour mettre au point une ébauche de protocole et le tester en conditions hypoxiques. Ces conditions étaient reproduites de manière artificielle dans une chambre hypoxique, on parle donc d'hypoxie normobarique. La chambre hypoxique présente différents avantages par rapport à l'altitude réelle, notamment sa praticité. En effet, dans la probabilité d'une étude future, il sera bien plus aisé d'utiliser une chambre simulant l'altitude plutôt que de réellement emmener des patients en altitude réelle. De plus, grâce à la chambre, nous pouvons définir précisément l'altitude souhaitée.

Lors de cette rencontre, après discussion entre les experts, nous avons choisi des exercices, des charges et des modalités d'exécution que nous pensions adaptés à une population souffrant de gonarthrose. Les exercices étaient simples à réaliser et permettaient un renforcement ciblé sur le quadriceps. Nous avons décidé de réaliser des squats bas et des fentes avant, répartis en trois séries de 12, 30 et 10 répétitions pour chaque exercice et pour chaque jambe, pour un total de six séries. Les quatre premières séries se déroulaient sans charges, alors qu'un poids de 10 kg était ajouté pour les deux dernières. Chacune des six séries était suivie d'une récupération passive de 90 secondes. La durée de récupération avait été proposée par l'ExH, sur la base de ce qui se fait traditionnellement pour ce type d'entraînement. Après un échauffement individuel de cinq minutes en normoxie, ce protocole a été testé par les cinq participants dans la chambre hypoxique, à une altitude simulée de 3800m. Enfin, à la fin de chaque série, la perception de l'effort était demandée à chaque participant en se basant sur l'échelle de Borg. Sur les six séries du protocole décrit ci-dessus, deux des participants n'ont pas été en mesure d'effectuer les deux dernières, alors que les trois autres les ont terminées avec un ressenti d'effort moyen de 15/20 sur l'échelle de Borg. L'intensité de l'effort était donc élevée.

À la fin de la séance, nous sommes sortis de la chambre hypoxique et avons échangé nos impressions. En questionnant les participants sur leurs observations, presque tous ont fait part d'une sensation d'étourdissement, due à la fois aux conditions et à l'intensité de l'effort. L'ExPT nous a même fait part de sensations de vertige. Il s'est également avéré que les experts et nous-mêmes étions plus essoufflés par rapport à un effort similaire qui

aurait été réalisé en normoxie. Ces sensations sont restées tout au long de l'entraînement, et se sont dissipées rapidement chez chacun d'entre nous à la sortie de la chambre. De plus, les experts et nous-mêmes étions unanimes pour dire que l'exercice des fentes avant était trop demandant s'il était réalisé un nombre de fois similaire au squat. La raison expliquant cela est que les deux jambes travaillent durant les fentes avant, ce qui double le nombre de répétitions pour chaque jambe. Nous avons donc convenu qu'il serait judicieux de réduire le volume total de l'entraînement. Nous nous sommes également accordés sur le fait que les squats bas seraient trop exigeants pour les patients souffrant de gonarthrose. En effet, l'ExPT a ressenti des douleurs dans le genou en réalisant l'exercice.

Enfin, nous sommes aussi arrivés à la conclusion que les exercices choisis seraient réalisables dans la chambre hypoxique, car ils ne nécessitent que peu de place et aucun matériel extérieur. Les possibilités de mesures supplémentaires, comme une mesure de lactate sanguin ou une évaluation de la douleur ressentie ont aussi été suggérées par l'ExRC.

Deuxième phase : test sous restriction du flux sanguin

Dans un deuxième temps, sur la base de notre expérience en hypoxie, des recommandations des experts et de la littérature préexistante, nous avons apporté quelques modifications au protocole testé en hypoxie. Nous avons d'abord décidé de demander des squats allant jusqu'à 90° de flexion de genou et non plus des squats bas. De plus, nous avons proposé une récupération de 90 secondes entre les séries et de 180 secondes entre les exercices. Puis, afin de réduire le volume global de l'entraînement, nous avons décidé de passer de trois à deux séries par exercice. Dans un souci de proposer un programme complet de renforcement du membre inférieur, nous avons également ajouté deux autres exercices à notre entraînement, le pas latéral résisté et le pont fessier. Pour finir, afin de compléter ce programme d'entraînement, nous avons jugé utile de proposer un échauffement, ainsi qu'un retour au calme après la séance. En effet, suite à notre première expérience en hypoxie, les experts et nous-mêmes avons tous senti une congestion musculaire plus marquée qu'après un entraînement de force standard. De plus, nous avons également tous été sujets à des courbatures musculaires dans les jours qui avaient suivi la séance. Nous souhaitons donc garantir une transition plus douce jusqu'à l'état de repos.

Nous trouvions intéressant de réaliser l'échauffement et le retour au calme sur ergocycle, car cela nous permettrait de standardiser le protocole et ciblerait la musculature du membre inférieur nécessaire à notre programme d'entraînement. Pour ces deux éléments, nous avons déterminé les modalités suivantes, un pédalage continu à une intensité de 30 Watts à un rythme de 70 à 80 rotations par minutes.

Nous avons ensuite pris contact avec l'ExBFR, afin de réaliser un test sous restriction de flux sanguin et ainsi observer la faisabilité de nos exercices dans ces conditions. Ce dernier a dans un premier temps validé le choix de nos exercices, qu'il trouvait adaptés pour une patientèle présentant une gonarthrose. Il a cependant mentionné le fait qu'en définissant un nombre de répétitions fixe, il nous serait impossible d'atteindre une intensité propre à chaque participant. En effet, étant donné que la population testée serait hétérogène, la difficulté de l'entraînement ne serait pas la même pour tous les participants. Il nous a donc suggéré de réaliser les séries d'exercices jusqu'à l'épuisement, afin d'être en mesure d'amener tous les sujets à la même intensité. L'ExBFR a aussi émis une réserve sur le fait que les exercices choisis seraient peut-être trop exigeants pour certains patients, et qu'il leur serait difficile d'atteindre le nombre de répétitions souhaité. Il nous a enfin conseillé de tout bonnement supprimer les charges surajoutées, arguant que le poids de corps des sujets nous permettrait d'atteindre, voire même de dépasser la faible intensité souhaitée pour ce type d'entraînement. Il a cependant validé les temps de récupération choisis, ceux-ci étant jugés adéquats pour garantir suffisamment de récupération, tout en maintenant un stress métabolique élevé.

Pour terminer, l'ExBFR a aussi émis un doute sur l'intensité de l'échauffement, qu'il trouvait trop faible, et nous a proposé de l'augmenter à 50 Watts. Enfin, il n'a pas jugé le retour au calme indispensable au vu de l'intensité plutôt faible qui serait demandée aux sujets.

Avant de tester notre protocole en conditions occlusives, l'ExBFR a encore partagé son expérience sur l'occlusion sanguine avec nous. Il avait en effet déjà testé des exercices de renforcement des membres inférieurs avec une pression occlusive maximale en compagnie de l'ExPT. Lors de cette séance, le garrot pneumatique de 11cm de largeur était appliqué dans le pli inguinal, le plus proximal possible. L'ExPT avait trouvé l'entraînement sous restriction de flux sanguin plus agréable que l'entraînement de force standard, ses douleurs liées à l'effort apparaissant plus tardivement.

Sur la base de ces constatations, nous avons ensuite testé le protocole tel que nous l'avions imaginé à ce stade. Nous avons d'abord essayé de placer le garrot directement dans le pli inguinal, puis, nous l'avons déplacé distalement de cinq centimètres, car certains auteurs ont observé des adaptations musculaires en amont de l'occlusion (Abe et al., 2012; Yasuda et al., 2010). Nous avons constaté que mettre le garrot légèrement en dessous du pli inguinal pouvait être plus confortable, notamment pour la gent masculine. Nous avons ensuite effectué des répétitions de certains de nos exercices sous occlusion totale, puis, comme le suggère la littérature, sous occlusion partielle, en relevant scrupuleusement toutes nos sensations et l'intensité de nos efforts sur l'échelle de Borg. Il s'est avéré que l'occlusion partielle était plus confortable que l'occlusion totale et l'ExBFR nous a rejoints sur ce point. Enfin, nous avons débattu le fait de garder le stimulus occlusif durant les récupérations inter-exercices ou non, et avons testé ces deux modalités. Après discussion, aucun de nous n'a semblé gêné par les garrots durant les pauses, surtout si l'occlusion était réglée à un niveau sous-maximal.

Il a ensuite été débattu des possibilités s'offrant à nous pour déterminer un pourcentage d'occlusion précis et propre à chaque patient. Il existe deux moyens principaux pour déterminer l'occlusion maximale, pour ensuite en tirer un pourcentage : l'échographie Doppler et la palpation du pouls pédieux. L'échographie est le moyen le plus fiable et le plus précis. Il permet d'observer les flux sanguins et de savoir précisément quand le flux artériel est complètement obstrué. L'ExBFR abonde dans ce sens, mais émet cependant une réserve sur le coût d'une telle machine, ainsi que la nécessité d'être formé pour l'utiliser. La seconde méthode consiste à déterminer l'occlusion grâce au pouls pédieux. Pour ce faire, il faut trouver l'artère et palper les pulsations tout en augmentant la pression du garrot. Une fois le pouls disparu, nous savons alors que nous avons atteint la pression d'occlusion artérielle complète. Notre expert était d'accord avec nous pour dire que cette méthode était bien plus rapide et moins couteuse, mais également beaucoup moins précise.

Avant de nous quitter, nous avons encore échangé avec notre ExBFR sur les modalités d'occlusion, sur le choix et l'intensité des exercices pour travailler avec des sujets fragilisés ou encore sur le TST nécessaire pour obtenir des adaptations musculaires. L'ExBFR nous a rendus attentifs quant à l'importance du TST musculaire pour induire des adaptations hypertrophiques, en s'appuyant sur l'étude de Toigo et Boutellier (2006). Il nous conseillait une durée optimale de six secondes par répétition, réparties en trois

secondes pour la phase excentrique et trois secondes pour la phase concentrique. Selon lui, le minimum pour être efficace est de quatre secondes par répétition. Après avoir testé les deux modalités, nous nous sommes mis d'accord pour dire qu'une durée de six secondes serait probablement trop exigeante pour une population novice en renforcement. Enfin, l'utilisation d'un métronome pour garantir une exécution précise nous a été recommandée par plusieurs experts et nous a, par conséquent, semblé adéquate et justifiée.

Troisième phase : rencontre avec les experts à la clinique romande de réadaptation

À la suite de notre entretien avec l'ExBFR et en nous référant à ses recommandations, nous avons à nouveau apporté des modifications à ce projet. Désormais, nous pensions faire deux séries d'un nombre de répétitions maximales par exercice. Nous avons donc envoyé cette nouvelle ébauche de protocole aux ExPT et ExH, afin d'avoir leur avis sur la pertinence de nos choix. Un entretien a ensuite été convenu à la CRR, afin de clarifier certains points de notre travail.

Lors de cet entretien, les experts nous ont fait part de plusieurs remarques sur les modalités de notre entraînement. L'ExPT nous a mis en garde sur la difficulté d'amener des patients souvent peu entraînés à une intensité maximale. La plupart risqueraient de ne pas y arriver, et nous pourrions perdre l'adhésion des autres avec une intensité trop élevée. Il nous a conseillé de plutôt choisir une intensité sous-maximale. Il nous a également suggéré la lecture d'un article dans lequel il est proposé de doser l'intensité de l'exercice de manière inversement proportionnelle à l'EVA. Par exemple, si le patient évalue sa douleur à 3/10 sur l'EVA, il serait avisé d'élever l'intensité de l'exercice à 7/10 selon l'échelle de Borg modifiée (Meakins & Cormack, 2020).

Concernant le choix des exercices, l'ExH nous a fait part des mêmes craintes que l'ExBFR avant lui, à savoir qu'ils seraient trop difficiles pour certains sujets. Il nous a suggéré de prévoir des adaptations de difficulté pour chaque exercice, de manière à ce que tous les patients puissent les réaliser. L'expert nous a donné quelques idées d'adaptations, et nous a invités à en définir pour chacun de nos exercices. De ce fait, un nombre plus grand de sujets pourrait participer à l'étude. Il a rejoint l'ExPT sur l'importance de gagner l'adhésion des patients au projet. Pour ce faire, il faut éviter de les mettre en situation d'échec. Enfin, il a également validé l'échauffement sur ergocycle

à 50 Watts et a rejoint l'ExBFR sur le fait qu'un retour au calme ne soit pas nécessaire dans ces conditions.

L'ExH nous a aussi dit que nous devrions trouver un moyen pour déterminer la difficulté optimale de l'exercice que devra réaliser le patient et cela sans faire un test de 1-RM, par souci de praticité. Ensemble, nous avons donc proposé d'introduire une répétition de dix squats lors de l'échauffement d'une séance de familiarisation. De ce fait, cela nous permettrait d'évaluer la capacité physique du participant en demandant son ressenti de l'effort sur l'échelle de Borg modifiée. Grâce à ces informations, il serait ensuite décidé, pour chaque exercice, si le patient devra réaliser la version classique ou simplifiée.

Nous avons également abordé les modalités d'entraînement, en évaluant toutes les possibilités qui s'offraient à nous dans un but d'augmenter l'hypertrophie en profitant au mieux du stimulus hypoxique. Le choix des exercices, la charge, le nombre de répétitions ou encore les temps de récupération ont été discutés, en essayant de trouver la meilleure alternative pour chaque point. En débattant avec l'ExH, nous nous sommes aperçus que plusieurs possibilités s'offraient à nous. Nous pouvions choisir un type d'entraînement avec des charges lourdes, proche de ce qui se fait traditionnellement, ou alors un entraînement avec des charges plus légères et un nombre de répétitions plus grand. L'intérêt de l'entraînement avec des charges légères résulte dans le fait que notre patientèle sera novice en entraînement de force et fragilisée par l'arthrose. De plus, la comparaison avec l'entraînement sous BFR serait plus aisée dans ces conditions. Enfin, l'ExH a validé le TST choisi pour chaque répétition. En outre, il nous a informés que le fait d'avoir une longue phase excentrique aurait un effet mécanique favorisant l'hypertrophie. Il nous a également parlé du TST minimum d'un exercice permettant de provoquer des adaptations hypertrophiques. C'est aussi pour cela que notre expert émettait une réserve quant à notre proposition de réaliser des séries jusqu'à épuisement. En effet, il craignait que certains participants ne réalisent pas suffisamment de répétitions, donc qu'ils ne passent pas suffisamment de TST pour induire les adaptations musculaires souhaitées.

Quant à la problématique du temps de récupération, l'ExH nous a fait part de l'importance de trouver un juste équilibre entre le temps de récupération et la durée de l'exercice, en s'appuyant sur l'article de Schoenfeld et al. (2010). En effet, une pause plus courte induirait un stress métabolique plus grand. Nous avons alors émis l'idée d'un temps de récupération plus court en hypoxie que sous BFR, afin de tenir compte de la différence

potentielle du stress métabolique engendré dans le muscle. L'ExH a trouvé cette idée intéressante et nous a encouragés à approfondir encore la littérature, afin d'avoir des temps de récupération optimaux pour chaque condition.

Annexe 8

Évaluation de l'effort perçu (échelle de Borg modifiée/RPE) en fonction de l'exercice de résistance	
<i>Évaluation</i>	<i>Description de l'effort perçu</i>
10	<i>Effort maximum</i>
9.5	<i>Plus de répétitions possible, mais augmentation de la charge possible</i>
9	<i>1 répétition encore possible</i>
8.5	<i>1 – 2 répétitions encore possibles</i>
8	<i>2 répétitions encore possibles</i>
7.5	<i>2 – 3 répétitions encore possibles</i>
7	<i>3 répétitions encore possibles</i>
5 – 6	<i>4 -6 répétitions encore possibles</i>
3 – 4	<i>Effort faible</i>
1 – 2	<i>Peu, voire pas d'effort</i>

Figure 14 : Échelle expérimentale de l'évaluation de l'effort perçu en fonction de l'exercice de renforcement, traduit de Zourdos et al. (2016)