

UNIVERSITE DE LILLE
FACULTE DE MEDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2020

THESE POUR LE DIPLÔME D'ETAT DE DOCTEUR EN MEDECINE

**Application du dispositif Atlas, un exosquelette d'assistance lombaire, en
mode renforcement musculaire**

Présentée et soutenue publiquement le 23 juin 2020 à 18h au Pôle Recherche
Par Ingrid SOUST

JURY

Président:

Monsieur le Professeur André THEVENON

Assesseurs:

Monsieur le Professeur Julien PACCOU

Monsieur le Docteur Fabien MORETTO

Monsieur le Docteur Alain CHEVUTSCHI

Directeur de thèse:

Monsieur le Professeur Vincent TIFFREAU

LISTE DES ABBREVIATIONS

LPPR: Liste des Produits et Prestations Remboursables

PLAD: Personal Lift Assisting Device

BNDR: Bending Non Demand Return

CVC: Cybernic Voluntary Control

CAC: Cybernic Autonomous Control

EEG: Electroencéphalogramme

EMG: Electromyogramme

NMES: Neuromyoélectrostimulation

TENS: Stimulation nerveuse électrique transcutanée

VO₂: Débit de consommation de dioxygène

VCO₂: Débit de production de dioxyde de carbone

QR: Quotient Respiratoire

PNF: Facilitation proprioceptive neuromusculaire

SOMMAIRE

RESUME.....	1
INTRODUCTION.....	2
I. Ceintures lombaires.....	3
A. Présentation et remboursement.....	3
B. Conception et impact clinique.....	3
C. Recommandations et mécanisme d'action.....	4
D. Controverse autour des ceintures lombaires.....	4
II. Exosquelettes.....	6
A. Historique des exosquelettes de compensation rachidienne.....	6
B. Autres systèmes de compensation rachidienne plus récents.....	8
1. <i>Exosquelette CORFOR</i>	8
2. <i>Exosquelette LAEVO</i>	9
3. <i>Exosquelette SPEXOR</i>	10
4. <i>HAL for Care Support</i>	11
5. <i>Vertetrac</i>	12
C. Résumé sur les exosquelettes rachidiens.....	13
1. <i>Mécanismes d'actions</i>	13
2. <i>Travaux d'études sur les exosquelettes de tronc</i>	13
3. <i>Pistes d'améliorations futures</i>	14
4. <i>Comparaison des exosquelettes existants avec Atlas</i>	15
5. <i>Point sur la littérature des exosquelettes de tronc</i>	15
III. Présentation du système Atlas.....	16
A. Description du dispositif.....	16
B. Contre-indications de l'Atlas.....	18
C. Fonction connectée.....	18
D. Travaux réalisés avec Atlas.....	21
1. <i>Dans le domaine de la rééducation</i>	21
2. <i>Dans le domaine de la médecine du travail</i>	22
IV. Exercices physiques et renforcement musculaire rachidien.....	22
A. Renforcement musculaire du tronc.....	22
B. Autres exercices physiques dans la lombalgie.....	23
C. Efficacité de l'activité physique dans la lombalgie.....	24
V. Autres dispositifs d'évaluation et de renforcement musculaire du tronc.....	25
A. Isocinétisme.....	25
B. Ceinture de renforcement musculaire abdominal.....	28
C. Isométrie.....	29
1. <i>Autres machines de renforcement et d'évaluation du tronc</i>	29
2. <i>Dynamomètres portables</i>	31
D. Electrostimulation.....	34
1. <i>Description</i>	34
2. <i>Mécanisme d'action</i>	35
3. <i>Indications et contre-indications</i>	35
4. <i>Limites de l'électrostimulation</i>	36
5. <i>Pistes d'améliorations futures</i>	37
6. <i>Place de l'électromyostimulation dans le rachis</i>	37

PROTOCOLE.....	39
I. Objectifs de l'étude.....	39
A. Objectif principal de l'étude.....	39
B. Objectif secondaire de l'étude.....	39
II. Schéma de l'étude.....	39
III. Description de la population.....	41
A. Critères d'inclusion.....	41
B. Critères d'exclusion.....	41
C. Calcul du nombre de sujets nécessaires.....	41
IV. Critère de jugement.....	42
A. Critère de jugement principal.....	42
B. Critère de jugement secondaire.....	42
V. Analyse statistique.....	42
VI. Etude pilote sur un sujet.....	43
VII. Hypothèses sur les résultats attendus.....	45
VIII. Discussion.....	46
A. Choix des variables recueillies.....	46
B. Discussion des résultats préliminaires obtenus sur un sujet.....	47
C. Limites du protocole.....	50
CONCLUSION.....	53
BIBLIOGRAPHIE.....	54
ANNEXES.....	62
Annexe 1: Schéma de mise en place d'Atlas.....	62
Annexe 2: Formulaire du comité d'éthique de la recherche.....	63
Annexe 3: Rappels anatomiques du tronc.....	65

RESUME

Contexte : De nombreux dispositifs applicables au rachis ont vu le jour en vue d'apporter une aide à la lombalgie chronique, dans le domaine de la médecine et de la santé au travail. Les exosquelettes et ceintures lombaires concentrent leur action dans le soulagement de la douleur et dans la prévention primaire et secondaire, tandis que l'isocinétisme et d'autres dispositifs sont conçus pour l'évaluation musculaire et le renforcement musculaire du tronc. Le nouveau dispositif Atlas, un exosquelette lombaire, combine toutes ces différentes fonctions via des actionneurs et une interface connectée, dans le but d'être un outil pertinent dans la rééducation de la lombalgie chronique. Dans ce contexte, nous avons élaboré un protocole afin d'évaluer la consommation de dioxygène lors de l'utilisation de Atlas en mode renforcement musculaire.

Protocole : Un minimum de 15 volontaires sains devra réaliser une série de flexion et d'extension du rachis avec et sans le dispositif Atlas. La durée de l'exercice sera de 3 minutes. Le rythme auquel seront faits les mouvements sera fixé par un métronome. Le fait de commencer avec ou sans le dispositif sera randomisé. Le critère de jugement principal sera le débit de consommation de dioxygène (VO_2). Les critères de jugement secondaires recueillis seront le débit d'éjection de dioxyde de carbone (VCO_2), la fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire et la tension artérielle.

Retombées cliniques : L'hypothèse émise est que le port du dispositif Atlas dans la réalisation de cet exercice augmentera le VO_2 d'environ 50%. Ce travail s'inscrit dans le but d'utiliser Atlas en conditions réelles pour étayer les données sur son action et efficacité afin de pouvoir envisager la réalisation de protocoles de rééducation avec ce dispositif chez des patients lombalgiques.

INTRODUCTION

La lombalgie chronique est une pathologie fréquente. Bien qu'il soit difficile d'établir une prévalence de la lombalgie chronique, elle concerne près de 20% des accidents du travail et 7% des maladies professionnelles d'après l'Institut National de Recherche et de Sécurité (1). Elle se définit par une douleur localisée dans la région lombaire avec ou sans irradiation vers les membres inférieurs d'une durée de plus de 3 mois (2). Dans la plupart des cas, le mécanisme ou l'étiologie précise de la douleur ne sont pas retrouvés, on dit alors que la lombalgie est non spécifique. Des rappels anatomiques sont situés en annexe.

La lombalgie chronique est maintenant reconnue comme étant d'origine multi-factorielle et s'inscrit dans un modèle bio-psycho-social (3). Le traitement de première intention réside dans la kinésithérapie associant la remise en mouvement du rachis avec des exercices combinant le renforcement musculaire, des étirements et de la proprioception. La chirurgie et les programmes de rééducation intensifs multidisciplinaires sont des solutions de deuxième intention en cas d'inefficacité de la kinésithérapie initiale (4).

Le renforcement musculaire tient donc une place majeure dans la rééducation de la lombalgie, et de nombreux outils d'évaluation et de renforcement ont vu le jour. Le soulagement de la douleur a aussi amené à la conception d'outils destinés à soulager la douleur en alternative aux thérapeutiques médicamenteuses telles que les ceintures lombaires.

Atlas est un dispositif lombaire innovant alliant une fonction antalgique par le mécanisme de la traction vertébrale et une fonction dynamique de renforcement musculaire. Il s'agit dans ce travail de thèse de revoir l'étendue des outils et dispositifs accessibles de nos jours pour le rachis et de leur effet sur le système musculaire, puis d'élaborer un protocole d'étude expérimentale pour évaluer Atlas dans sa fonction de renforcement musculaire.

I.Ceintures lombaires

A. Présentation et remboursement

Les ceintures lombaires sont très répandues et facilement accessibles dans toutes les pharmacies. Ces orthèses sont inscrites en tant que dispositifs médicaux sur la liste LPPR, ainsi la prescription médicale sur ordonnance permet un remboursement par la sécurité sociale variable selon la hauteur de la ceinture. Les références LPPR du 31 juillet 2020 établissent leurs remboursements comme suit : 43,43€ pour les bandes et les ceintures de soutien lombaire, 47,19€ pour les ceintures de 21 cm de hauteur, et 55,86€ pour les ceintures de 26 cm de hauteur (5). Il en existe des souples, semi-rigides, lombaires ou thoraco-lombaires. Elles ont fait l'objet de nombreuses études et aussi de plusieurs revues de la littérature sur leur effet sur la colonne vertébrale.

B. Conception et impact clinique

Les ceintures lombaires sont conçus avec différents matériaux textiles (élastane, polyuréthane...), sans consensus particulier. Il apparaît que l'efficacité de ces dispositifs reposant donc en grande partie sur l'augmentation de la pression intra-abdominale dépend fortement de l'adhérence à la peau, qui est amenée à modifier de façon très importante la distribution de cette pression intra-abdominale lors des mouvements de l'utilisateur si l'adhérence n'est pas stable. Il apparaît aussi que la morphologie et notamment l'IMC joue un rôle important, les personnes ayant un IMC trop élevé bénéficieront de moins d'efficacité de la ceinture, car la pression générée par la ceinture risque d'être absorbée par les tissus graisseux avant d'atteindre la cavité abdominale (6). Les concepteurs ont donc tout intérêt à être vigilants

sur le textile utilisé, le système de fermeture de la ceinture, ainsi que sur les modèles de grande taille qui pourraient bénéficier d'un design bien spécifique à ce type d'IMC.

C. Recommandations et mécanisme d'action

Les dernières recommandations les concernant selon la Haute Autorité de Santé (HAS) datant de mars 2019 conseillent de les porter sur un temps court, sans précision sur le temps de port, pour aider à la reprise des activités habituelles, bien que leur efficacité n'ait pas été clairement démontrée à ce jour, lors d'un épisode de lombalgie aiguë (7). Elles n'ont pas non plus prouvé leur intérêt pour des temps de port prolongés. Leur effet stabilisateur de la colonne vertébrale n'est en revanche plus à démontrer (8–11), en entraînant une diminution des amplitudes rachidiennes. Plus la ceinture est rigide, plus la diminution de mouvements rachidiens est importante (9). Les articulations intervertébrales les plus restreintes en portant ces ceintures sont L3-L4 et L4-L5 (10). Elles réduisent la pression intra-discale tout en augmentant la pression intra-abdominale et des érecteurs du rachis (11,12). Elles rempliraient aussi un rôle de rappel proprioceptif (11). Leur effet sur la douleur est également unanime et montre une amélioration de la douleur, surtout dans la lombalgie aiguë de moins d'un mois.

D. Controverse autour des ceintures lombaires

Leur effet sur le système musculaire a fait l'objet d'interrogations quant à un possible effet délétère en cas de temps de port prolongé, selon l'hypothèse que les ceintures lombaires remplaceraient l'action musculaire stabilisatrice qui ne serait donc plus activée et serait donc amenée à décroître, et mènerait ultimement à une atrophie musculaire. De nombreuses études ont cherché à vérifier si ce phénomène était exact (10–15). La plupart d'entre elles n'observent

pas d'effet particulier (12), voire l'inverse (13). Cette inquiétude vis-à-vis de ce déconditionnement a aussi fait l'objet de revues de la littérature à part entière (16,17). Les conclusions de ces deux revues de la littérature attestent qu'il n'a pas été retrouvé de preuve sur un effet négatif des ceintures lombaires sur le système musculaire, avec toutefois un bémol concernant le manque d'études remplissant les critères d'une étude de haute qualité.

On peut relever plusieurs études comparant un groupe de patients portant un support lombaire et un autre groupe sans support lombaire. Celles-ci ont testé différents temps de port, allant de 3 semaines (14) à 6 mois (12). L'évaluation principale dans toutes ces études est l'analyse EMG, associée secondairement aux tests d'endurance classiquement utilisés lors des bilans tels que le Ito-Shirado et le Sorensen. La plupart de ces études, à l'instar des revues de la littérature, ne retrouvent pas d'effet délétère sur l'activité EMG ou sur l'endurance des muscles du tronc, y compris pour des temps de port très prolongés.

Si la plupart des études relèvent donc un effet neutre ou peu impactant cliniquement par rapport au bénéfice sur la douleur, une étude récente comparative entre trois groupes sur le port d'une ceinture lombaire souple pendant 4 semaines pendant minimum 4h par jour en position debout a même trouvé des effets positifs au port d'une ceinture lombaire, plus encore lorsqu'elle est fortement serrée, générant donc une haute pression intra-abdominale, en terme de force musculaire des abdominaux et des spinaux, de proprioception, ainsi qu'en terme de douleurs et d'évaluation fonctionnelle (13).



Ceinture lombaire souple Lombastart par Thuasne

(Source: fr.thuasne.com)

Ceinture dorso-lombaire souple Lombax High par Thuasne.

(Source : fr.thuasne.com)



Ceinture lombaire semi-rigide Lombastab par Thuasne.

(Source: fr.thuasne.com)

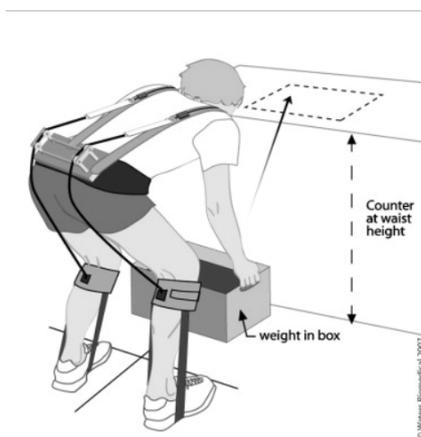
II. Exosquelettes de compensation rachidienne

A. Historique des exosquelettes de compensation rachidienne

Si le tout premier exosquelette a fait son apparition dans les années 1960 (Hardiman par General Electrics en 1966, à visée logistique pour le chargement des porte-avions) (18), les premiers appareils centrés sur le rachis et ayant fait l'objet d'études publiées apparaissent à partir des années 2000. Leur design et leur conception sont donc récents. Nous pouvons citer parmi les précurseurs le Personal Lift Assisting Device (PLAD) (19–25) qui est un système passif exploitant les propriétés de bandes élastiques conçu spécifiquement pour les activités de soulevé de charge et de flexion du tronc. Les études le concernant ont globalement montré une diminution de l'activité musculaire via EMG de surface des érecteurs du rachis sans

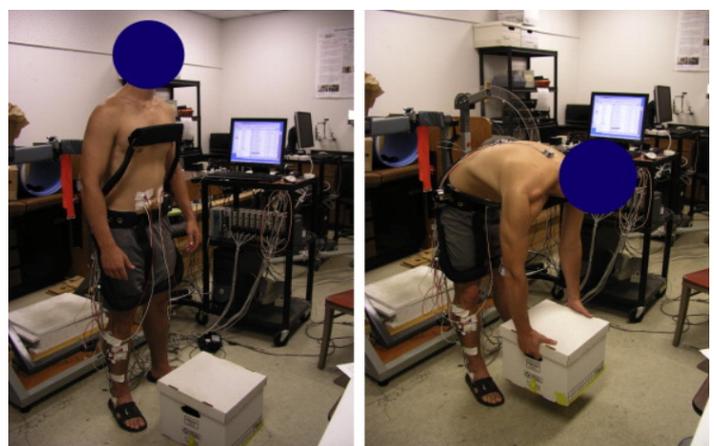
modification du travail des abdominaux, et une modification de la technique de soulevé de charge avec plus de flexion des membres inférieurs (hanches et genoux) et moins de flexion rachidienne lombaire et thoracique. Une étude n'a pas montré d'effet sur la consommation en oxygène ni sur la fréquence cardiaque au cours d'un effort de soulevé de charge d'une durée de 15 minutes (9). Nous pouvons citer à nouveau le Bending Non Demand Return (BNDR) weight transfer device ((Limbic Systems Inc., Ventura, CA). Les études le concernant ont retrouvé des résultats similaires à ceux du PLAD, avec une diminution de la flexion du tronc et une diminution de l'activité musculaire de l'ensemble des érecteurs du rachis (26,27).

Le HappyBack (ErgoAg, Aptos, CA) et le Bendezy (Bendezy LiteTop, Mount Barker, Western Australia) ont tous deux été conçus pour les métiers de l'agriculture, mais ceux-ci n'ont pas fait l'objet de publications, et sont aussi plus encombrants.



Personal Lift Assist Device.

Bending Non Demand Return (BNDR) weight transfer device.



B. Autres systèmes de compensation rachidienne plus récents

1) Exosquelette CORFOR (I-Trema, Aix en Provence, France)

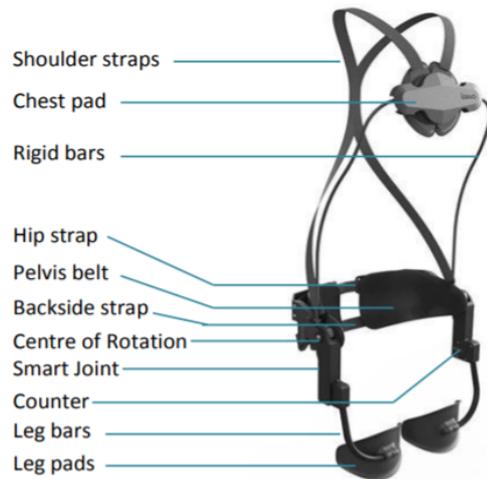
Il s'agit d'un système passif ressemblant au PLAD et au BNDR sous forme de harnais allant des épaules aux genoux ayant pour principe de soulager toute la chaîne postérieure dans des situations de ports de charge répétés via des propriétés élastiques. Le CORFOR a pour vocation d'être utilisé dans les métiers d'usinage.

Il en résulte des effets similaires au PLAD et au BNDR, avec une diminution de la flexion rachidienne et une augmentation de la flexion des membres inférieurs lors de la station penchée en avant, ainsi qu'une activité musculaire moindre des érecteurs du rachis lombaire et des biceps fémoraux. Une analyse sur 2 utilisateurs n'a pas montré de modification sur la fréquence cardiaque mais une récupération plus rapide avec le CORFOR. Ces résultats réalisés sur deux personnes ne sont pas généralisables (Source: <http://corfor.fr/pdf/etude-i-trema-corfor-v2-2016.pdf>).



2) Exosquelette LAEVO (Intespring B.V et Delft University of Technology, Pays-Bas) (28)

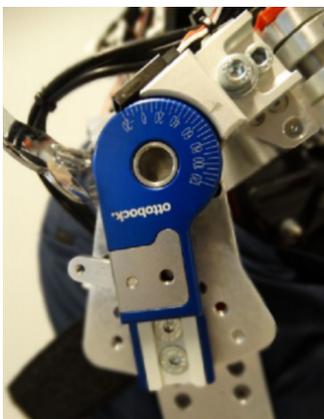
Cet exosquelette est le fruit d'un projet nommé X-Arm et a été créé en 2010. A la ceinture lombaire s'ajoutent un appui thoracique antérieur et des sangles aux deux cuisses, dont le rôle principal est de maintenir le dos droit pendant les actions nécessitant une posture en avant en particulier les ports de charge, en sollicitant de façon plus importante les membres inférieurs du porteur, cela afin de réduire au maximum les surpressions au niveau de la colonne vertébrale. Le LAEVO a fait l'objet de plusieurs publications entre 2016 et 2019. Après une première étude sur son effet sur l'endurance et l'activité musculaire rachidienne prometteuse (plus d'endurance en station penchée et moins d'activité musculaire EMG), d'autres publications ont montré que l'exosquelette remplissait sa fonction attendue dans les activités statiques pour le confort, l'assistance à la tâche demandée, et la prévention des risques pour la lombalgie commune ; cependant des résultats plus contradictoires étaient constatés dans les activités demandant de l'amplitude au niveau du tronc ou de la flexion de hanche comme marcher, soulever, grimper... Son effet sur le coût métabolique a aussi été étudié et montrait également des effets opposés, la dépense énergétique en soulevant des charges étant moindre, mais d'autres activités comme marcher avec ce dispositif accentuait la dépense énergétique.



Exosquelette LAEVO (Source : article original S.J. Baltrusch et Al. (28))

3) Exosquelette SPEXOR

Cet exosquelette commandé par l'Union Européenne et fabriqué en Slovénie a été conçu pour prévenir et soulager la lombalgie chronique lors de ports de charges lourdes dans le monde du travail (29). Une étude publiée sur des travailleurs en aéroport lors d'une activité de port de charge répétée a mis en évidence une diminution moyenne du coût métabolique ainsi que de l'activité musculaire des muscles extenseurs du rachis, expliquée notamment par la configuration assistant les hanches et l'articulation L5-S1. Son design est encore à améliorer car il est pour l'instant trop encombrant pour être utilisé dans les espaces restreints comme par exemple en usine ou autre.



Exosquelette SPEXOR (Source : Article original S.J. Baltrusch et Al. (29))



4) HAL for Care Support (CYBERDYNE, Inc., Ibaraki, Japan) (30)

Cet exosquelette a obtenu la certification européenne en 2014. Il comporte une accéléromètre 3D dans la structure qui mesure l'angle absolu du tronc, et des capteurs d'angulation avec un goniomètre électronique au niveau des jonctions aux hanches. Il fonctionne à l'aide d'une batterie externe rechargeable. Sa fonction repose sur deux modes fonctionnant ensemble : le « Cybernic Voluntary Control » (CVC) et le « Cybernic Autonomous Control » (CAC) ; le premier faisant fonction d'assistance intelligente aux mouvements grâce à la capacité de détection de signaux bio-électriques via des électrodes posées au niveau des spinaux lombaires, lui permettant d'anticiper les mouvements volontaires de l'utilisateur et de les assister et accompagner, le deuxième ayant un rôle de compensation de la gravité sur le poids de l'utilisateur. Il a été conçu en première intention pour le personnel soignant ou les aides à la personne, puis son indication s'est élargie à tous les métiers à source de contrainte pour le dos et plusieurs versions sont disponibles. Une étude pour valider son efficacité pendant les activités de soulevé de charge a également été accomplie et a révélé une augmentation du port de charge avec le HAL, accompagnée d'une baisse du ressenti subjectif de la fatigue au niveau lombaire.

Les promoteurs de ce dispositif encouragent les utilisateurs à le porter sans restriction, ou même de suivre une rééducation rachidienne avec le dispositif porté, bien qu'il n'y ait pas d'étude à ce jour de rééducation rachidienne dite « classique » ou en école du dos assistée d'un tel dispositif.



Exosquelette HAL for Care Support (Source : cyberdyne.jp)



5) Vertetrac (Meditrac, Etats-Unis)

Le système Vertetrac est un dispositif de décompression lombaire ambulatoire. Cet appareil peut agir dans les trois dimensions de l'espace, avec une application de forces verticales, horizontales, symétriques ou asymétriques. La traction vertébrale est réglable manuellement par des leviers, tandis qu'une force horizontale est exercée sur la zone douloureuse par un appui réglable manuellement par un disque. Ce corset mobile laisse également la liberté de tous les mouvements du rachis. Ce dispositif, contrairement aux autres présentés ci-dessus cible plus particulièrement l'espace intervertébral et la hernie/protrusion discale.

Les concepteurs conseillent un temps de port de 30 minutes couplé à des exercices de marche pendant 1 à 2 semaines avec pour finalité le soulagement de la douleur.

Cet appareil a fait l'objet de deux études non publiées non disponibles sur les bases de données. La première montrait une bonne réponse globale au Vertetrac pour neuf patients lombalgiques sur dix en le portant comme indiqué ci-dessus. La deuxième de plus grande envergure a montré une diminution de la douleur chez 82,6% des patients (n = 212) avec une hernie discale avérée après 20 à 35 sessions d'une demi-heure avec le Vertetrac. La diminution de la douleur a permis de dégager des résultats supérieurs chez les lombalgies aiguës datant de moins de 1 mois.



Vertetrac par Meditrac

(Source: meditrac.co.il)

C. Résumé sur les exosquelettes rachidiens

1) Mécanismes d'actions

Il existe deux sortes d'exosquelettes rachidiens, les actifs et les passifs. La première catégorie comprend des dispositifs assistés par des moteurs ou de l'électronique pour augmenter la puissance de l'utilisateur. Atlas en fait partie, ainsi que le HAL et le Vertetrac. Les passifs utilisent les propriétés de différents matériaux (élastiques, carbone ...) pour sauvegarder l'énergie de l'utilisateur et la restaurer ensuite, comme par exemple le Laevo, le Spexor, le PLAD ou encore le Corfor. La liste n'est pas exhaustive, d'autres systèmes semblables existent et sont disponibles sur le marché (The Muscle Suit (Innophys Co., Ltd, Tokyo, Japan)).

2) Travaux d'études sur les exosquelettes de tronc

Le monde du travail et de la santé au travail ont été les principaux investigateurs mais aussi demandeurs des exosquelettes rachidiens jusqu'à présent en tant que prévention primaire ou secondaire de la lombalgie commune, en particulier sur le facteur de risque identifié de la station penchée prolongée et le port de charge répété et/ou de charges lourdes. Le rôle de ces dispositifs dans la rééducation et/ou le renforcement n'a pas été recherché, cela n'étant pas le but de leur conception.

Des études ont donc testé ces dispositifs rachidiens avec pour finalité à long terme de soulager la lombalgie chronique (29) (31), et les mettant en condition réelle avec des activités précises et répétitives. La tâche majoritairement étudiée avec ces exosquelettes est le soulevé de charge à répétition (19,28,29,32-34). L'ensemble des publications s'accordent à dire que le coût

métabolique et musculaire est moindre dans cette activité en portant les différents exosquelettes.

Certaines publications se sont intéressées à l'étude de différents paramètres pouvant agir sur la biomécanique du rachis, notamment l'effet de la compression thoracique et/ou abdominale (31).

Dans une étude sur cas unique, Johnson et Al ont montré que différentes intensités de compression abdominale et thoracique jouaient sur le signal électrique des muscles spinaux pour la même tâche demandée, tantôt l'augmentant, tantôt la diminuant.

3) Pistes d'améliorations futures

Tous ces dispositifs ont aussi comme effet secondaire de diminuer les amplitudes rachidiennes, ce qui peut parfois être une entrave pour leur utilisation régulière dans le monde du travail ou de la vie quotidienne. La recherche d'une solution à ce manque de mobilité est un axe de recherche pour les futurs exosquelettes (35). Par ailleurs, pour les exosquelettes de la catégorie « actif », il reste à perfectionner la fonction d'assistance aux mouvements. Les deux principaux mécanismes utilisés sont : soit par détection des signaux électriques du corps humain avec l'aide de l'EEG ou de l'EMG avec des électrodes, soit par des signaux mécaniques physiques envoyés par le système musculo-squelettique (par exemple les forces et angles appliqués aux jonctions, la résistance ou l'accélération). Les exosquelettes de la première catégorie de mécanisme utilisent majoritairement l'EMG qui obtient de meilleurs résultats qu'avec l'EEG. Mais la quantification du signal électrique est difficile. D'autres pistes d'analyse et d'anticipation du mouvement de l'utilisateur dans ce cadre sont encore à parfaire (36). De plus, le poids de ces exosquelettes ainsi que leurs points d'appui sont souvent une source d'inconfort et sont pour l'instant un des facteurs limitants à leur généralisation (4).

Enfin, si les orthèses lombaires sont à risque de déconditionnement musculaire du dos

lorsqu'elles sont portées en excès, alors les exosquelettes peuvent l'être aussi, ce qui apporte un intérêt supplémentaire au dispositif Atlas et à sa fonction de renforcement.

4) Comparaison des exosquelettes existants avec Atlas

Si les concepteurs à l'origine du HAL et du Vertetrac encouragent l'activité physique et l'utilisation de leurs modèles pendant une rééducation, tous ces dispositifs ont comme première intention le soulagement de la douleur. Il n'y a pas d'exosquelette lombaire pensé dans un but de renforcement musculaire. Il ressort dans les études des exosquelettes passifs et actifs présentés ci-dessus que la dépense énergétique est globalement diminuée, ainsi que l'activité musculaire lors d'activités fonctionnelles comme le port de charge. Aucun dispositif de ce type n'a été utilisé à des fins de renforcement musculaire, au cours duquel il est attendu, au contraire, une augmentation de la dépense énergétique à l'utilisation.

5) Point sur la littérature des exosquelettes de tronc

Les études ont démontré que l'activité musculaire et la dépense énergétique sont toutes deux diminuées lors du port d'un exosquelette. De plus, lors de mesures réalisées par EMG pour l'enregistrement de l'activité musculaire des différents muscles du rachis, il a été mis en évidence que l'activité musculaire est très variable selon la tâche demandée à la personne, pouvant l'augmenter comme la diminuer (14). Il apparaît donc que les exosquelettes d'assistance rachidienne sont à ce jour peu adaptables, et que si l'on souhaite préserver un muscle en particulier, il conviendra de demander au patient une tâche standardisée, répétitive et analytique, ce qui est impossible à transposer dans la vie quotidienne. La plupart des exosquelettes testés, notamment les passifs, montrent que si les muscles extenseurs du tronc

sont la plupart du temps préservés, les muscles des membres inférieurs sont quant à eux plus sollicités et sont donc plus sujets à une fatigue précoce (18). Koopman et Al., lors d'une étude sur la charge musculaire des érecteurs du rachis lors d'une station penchée statique à différentes hauteurs sans compensation par les membres inférieurs avec le Laevo, ont également décrit un phénomène de flexion-relaxation qu'il faut prendre en compte dans le design des exosquelettes. En effet, ce phénomène décrit depuis les années 1980 consiste à ce que les muscles érecteurs du rachis se relâchent complètement lors d'une flexion du tronc importante, de sorte que les structures ligamentaires et les disques intervertébraux portent seuls le poids du tronc et de la gravité dans cette position (37–44). Ce phénomène a été reconnu comme un facteur de risque de lésion ligamentaire et de lombalgie chronique commune. Or, le poids avec un exosquelette risque d'être plus important, et pourrait amener l'utilisateur à lutter contre le dispositif. Même si les auteurs soulignent que ce phénomène sera amoindri avec le recrutement des membres inférieurs, ils préconisent tout de même que ce point soit pris en compte dans la conception de ces dispositifs, d'autant que la flexion-relaxation survient pour des amplitudes très différentes selon les sujets, avec un seuil moyen à environ 80° de flexion du tronc. En revanche, si le phénomène de flexion-relaxation est un facteur de risque de développer des lésions et donc d'induire une lombalgie chronique, il apparaît que les personnes souffrant de lombalgie chronique ne présentent plus ce phénomène, possiblement par la douleur qu'une flexion importante induit, et/ou par mécanisme de protection de structures déjà lésées.

III. Présentation du système Atlas

A. Description du dispositif

Japet Medical ® est une start-up fondée en 2014 implantée sur le site d'Eurasanté à Loos, à proximité du CHRU de Lille. Le dispositif Atlas a pour principale indication le soulagement ou la prévention de la lombalgie chronique en appliquant une traction vertébrale au niveau lombaire. L'Atlas a déjà été décrit de façon exhaustive par Jordan Lannoy dans son mémoire.

Le dispositif Atlas est un exosquelette de traction lombaire axé sur le traitement des lombalgies. La traction est réalisée par quatre micromoteurs qui transmettent des forces à travers deux ceintures, permettant de diminuer la pression intra-discale, principalement au niveau L4/L5 et L5/S1, et de permettre au patient une rééducation active. Le poids sans batterie est de 1,65 kg. La batterie permet une autonomie d'environ 8h.

La ceinture du haut s'appuie sur les côtes inférieures et la ceinture du bas sur les crêtes iliaques. Ces ceintures se ferment par devant par des serrages en Velcro.

Les deux ceintures sont reliées entre elles par les quatre micromoteurs. Ce sont eux qui réalisent la traction. Ce sont eux aussi qui permettent la mobilité du tronc en portant la ceinture. La mobilité du tronc est possible dans tous les plans de l'espace, c'est-à-dire des mouvements de flexion et d'extension, d'inclinaisons latérales, et de rotation du tronc.

Il y a quatre paliers de traction avec une différence d'un kilogramme par palier soit 1, 2, 3 ou 4 kilogrammes par actionneur. Les micromoteurs peuvent donc au total soulager le rachis lombaire d'au moins 4 kilogrammes jusqu'à un maximum de 16 kilogrammes.

Le dispositif Atlas dispose de trois modes d'action différents : un mode accompagnement où seule la traction est appliquée, un mode renforcement où une résistance s'oppose aux mouvements du tronc en plus de la traction, et un mode perturbateur où les actionneurs réalisent des mouvements aléatoires contre le patient.

Une fois le dispositif installé, l'intensité de la traction vertébrale peut être contrôlée grâce à trois commandes manuelles : le bouton "ON/OFF", le bouton "+" et le bouton "-".

B. Contre-indications de Atlas

Comme cité plus haut l' Atlas est destiné en premier lieu aux patients lombalgiques.

Les contre-indications relatives à l'utilisation de l'exosquelette sont listées ci-dessous :

- déficit neurologique radiculaire ou médullaire,
- manifestation cutanée sur la région du tronc,
- traitement par neurostimulateurs implantés,
- scoliose avec un angle de Cobb $> 30^\circ$,
- indice de Masse Corporelle $> 30 \text{ kg/m}^2$,
- insuffisance respiratoire,
- grossesse,
- ostéoporose.

Les contre-indications absolues sont :

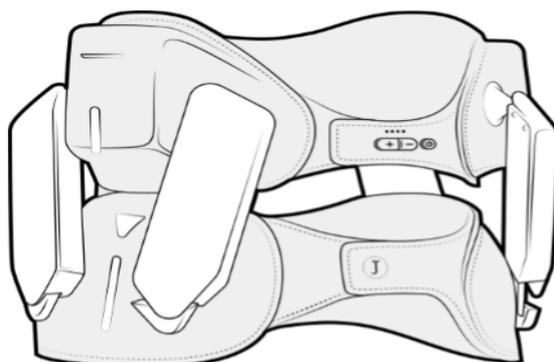
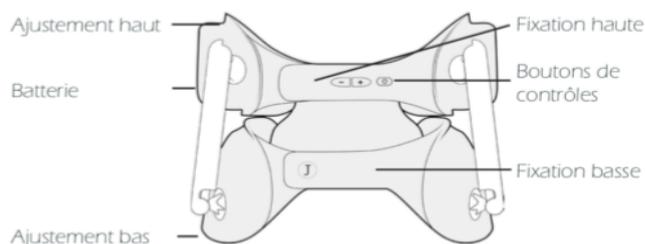
- antécédent de chirurgie d'arthrodèse,
- fracture récente du rachis dorso-lombaire,
- fracture de côte de moins de trois mois.

C. Fonction connectée

L'Atlas est connecté à un logiciel conçu spécifiquement pour cet appareil sur tablette du nom du « Dunamis ». C'est par la tablette que l'on choisit le mode du corset. Il est aussi possible de modifier l'intensité de la traction par ce biais. Le mode renforcement et le mode perturbateur sont également modulables, seulement par la tablette, pour varier le niveau de résistance appliquée et la fréquence des perturbations. L'écran permet de mesurer de surcroît les angles de mobilité du patient dans le plan frontal et sagittal.

Au logiciel s'ajoutent des serious games au nombre de onze, qui se déclinent en trois catégories d'exercices : souplesse, posture, et renforcement. L'interface garde en mémoire les performances quantitatives du patient (amplitude de mouvement, résistance appliquée, maintien postural...) ce qui permet d'obtenir des données chiffrées pour suivre l'évolution de la rééducation.

Il est possible de réaliser avec cette interface un bilan initial qui mesure la souplesse par rapport à l'amplitude maximale de mobilité du patient en flexion, extension, inclinaisons et rotations, la force par rapport au niveau de résistance pour lequel le patient peut réaliser trois séries de dix mouvements et enfin la posture par rapport au maintien d'une position stable avec le mode perturbateur pendant trente secondes. Ce bilan de mesures peut également être réalisé ultérieurement pendant la rééducation.



Vues de face et profil de Atlas (Source : Japet Medical, Loos, France).



Atlas porté, vues de dos et de face. (Source: japet.eu)



Atlas porté, vue de dos (Source : gobio-robot.com)

D. Travaux réalisés avec Atlas

1) Dans le domaine de la rééducation

Le corset Atlas a fait l'objet de deux études dans le cadre de deux mémoires, l'un de validation de Master 2 et l'autre de fin d'études.

Le mémoire de Jordan Lannoy, étudiant en masso-kinésithérapie en 2019, a porté sur l'intégration d'exercices fonctionnels dans l'interface ludique combinée à l'Atlas pour répondre aux trois objectifs de renforcement, souplesse, et proprioception du tronc selon des méthodes de séries et de répétitions validées par les kinésithérapeutes. Il reste à tester ces exercices sur des patients lombalgiques, et d'en tirer les forces et faiblesses pour réaliser une deuxième version du logiciel, voire d'y ajouter d'autres exercices d'auto-grandissement, de stretching des membres inférieurs, et d'antéversion/rétroversion du bassin.

Le mémoire de Clara Seghi, interne en médecine physique et de réadaptation en 2019, a porté sur l'évaluation de la réduction de la douleur chez les patients lombalgiques chroniques de plus de 3 mois en portant ce dispositif. Les données étaient recueillies sur cinq jours, pendant lesquels Atlas était porté une fois par jour pendant 1h en plus de la rééducation multidisciplinaire habituelle qui elle se faisait sans le dispositif, puis lors d'un parcours d'activité standardisé en crossover les deux derniers jours. La douleur selon l'EVA était le critère de jugement principal et était recueillie tous les jours. L'analyse montrait que l'EVA douleur était faiblement réduite lors du port du corset, ainsi que lors du parcours d'activité standardisé avec le corset, mais la plupart des résultats n'étaient pas significatifs et la diminution de la douleur n'atteignait pas chez tous les patients les 16 mm fixés comme seuil de pertinence clinique. Bien que l'effectif n'atteignait pas la taille attendue, le manque de diminution de la douleur pouvait aussi s'expliquer par le fait que l'EVA à l'inclusion était déjà peu importante (en moyenne de

28/100 mm), et potentiellement par le fait que les patients inclus étaient des patients qui n'en étaient pas à leur première ligne de traitement de leur lombalgie. Les résultats de cette étude pilote ne sont pas interprétables à ce jour du fait du manque de puissance de l'étude (18 patients inclus et analysés sur 32 patients attendus).

2) Dans le domaine de la médecine du travail

Il n'a pas encore été réalisé de travaux de recherche ou d'étude avec Atlas en entreprise. Cependant, il est prévu que l'Atlas fasse l'objet d'un travail de thèse de médecine du travail concernant les employés de la SNCF. Il est aussi à l'essai au niveau de l'emploi logistique dans des entreprises telles que ENGIE, FM Logistic ou encore Airbus et Naval Group.

IV. Exercice physique et renforcement musculaire rachidien

A. Détail des activités physiques dans le renforcement du tronc

Il est maintenant reconnu que la rééducation utile dans les lombalgies chroniques communes doit être « active », ce qui implique des exercices de renforcement musculaire. Plusieurs types d'activités physiques sont utilisées dont le renforcement musculaire du tronc. Si les programmes de rééducation combinent plusieurs types d'exercices entre eux et sont ainsi variables, on retrouve tout de même des similitudes entre les programmes, car certains exercices font consensus et sont couramment pratiqués par tous les thérapeutes.

Le renforcement musculaire dit « classique » consiste en un renforcement des muscles stabilisateurs du tronc et du « noyau » profond et vise les muscles spinaux, le multifide, les érecteurs du rachis, les abdominaux notamment le transverse de l'abdomen et le grand droit de

l'abdomen, ainsi que les carrés des lombes et les obliques internes et externes. Ces exercices peuvent être réalisés contre pesanteur ou contre résistance, avec ou sans machine, ou sous forme de gainage telles que dans les activités sportives de la vie courante (90,91). Une étude a montré que quelle que soit l'intensité du programme de renforcement musculaire, il est retrouvé tout de même une efficacité sur la douleur, l'incapacité fonctionnelle, la kinésiophobie, et les évaluations en isométrique, avec un léger avantage pour le programme le plus intensif (91). Une autre étude a comparé un programme de renforcement musculaire à un programme d'effort en aérobie et faisait ressortir de meilleurs résultats dans le groupe renforcement musculaire (92). Une autre étude par les mêmes auteurs laissait apparaître des résultats similaires à l'étude de Harts et Al. ; c'est-à-dire que lors de la comparaison entre plusieurs fréquences d'exercices de renforcement musculaire hebdomadaire, il a été constaté que si toutes les différentes intensités de programmes obtenaient des résultats, le programme avec la plus haute intensité (soit 4 jours par semaine d'exercices de renforcement avec intensité d'effort progressive) était celui avec les meilleurs résultats sur plusieurs aspects de la lombalgie (93).

B. Autres exercices pour le rachis dans la lombalgie

Les programmes de rééducation intègrent également des exercices de contrôle postural et de stabilisation du rachis lombaire. Cet exercice fait principalement intervenir la proprioception et l'endurance musculaire. La clé de ce concept réside dans le fait de trouver la position la plus neutre du bassin et passe par le fait de maîtriser l'antéversion et la rétroversion du bassin, puis d'intégrer cette position de façon automatique au quotidien (94,95).

Les activités aquatiques comme la balnéothérapie sont un bon atout dans la lombalgie chronique du fait des propriétés physiques de l'eau chaude qui apportent une résistance douce naturelle aux mouvements, un allègement du poids du corps entraînant moins de pression sur

le rachis ainsi qu'une relaxation musculaire par la chaleur (96).

Le concept de Kabat ou concept PNF (facilitation proprioceptive neuromusculaire) consiste à optimiser un mouvement via plusieurs techniques manuelles et fait intervenir plusieurs composantes du mouvement dont la proprioception. Les techniques couramment utilisées sont les séries de contractions isotoniques en rythme, les stabilisations rythmiques des muscles agonistes et antagonistes, ou le contracté-relâché (97). Plusieurs études ont attesté de son efficacité dans la réduction de la douleur, mais aussi dans les capacités fonctionnelles et sur l'activité musculaire en EMG (92,97–99).

Quelques travaux ont comparé le travail en aérobic, soit la marche et la course, ou le vélo, par rapport au renforcement musculaire dans la lombalgie, mais les études sont pour l'instant discordantes quant à la supériorité de l'un ou de l'autre (92,100).

C. Efficacité de l'activité physique dans la lombalgie

Les programmes de rééducation dans la lombalgie chronique non spécifique ont totalement intégré la pratique du renforcement musculaire du tronc via des exercices physiques et sportifs. De nombreuses études, revues et méta-analyses ont démontré l'efficacité de l'exercice physique sur le soulagement de la douleur à court terme et à long terme, ainsi que sur la condition physique et le bien-être des personnes lombalgiques (101–103). Plusieurs types d'exercices de renforcement sont couramment pratiqués et évalués dans les études, notamment les contractions musculaires contre résistance, des exercices de contrôle postural et de proprioception, des étirements, la méthode Pilate, le yoga, l'effort en aérobic, les activités aquatiques (101)

Les muscles du tronc ont un rôle central dans la lombalgie chronique. En effet, le déconditionnement musculaire rachidien est reconnu comme étant un facteur de risque de

lombalgie (104). Ainsi, il est attendu et dorénavant prouvé que le renforcement et/ou le reconditionnement de ces mêmes muscles provoquent une amélioration de la douleur. Devant la multiplicité des exercices possibles, une méta-analyse récente a voulu déterminer quels étaient les modes d'exercices les plus efficaces, car s'il est entendu que l'activité physique fonctionne bien, il est encore difficile de préciser quels sont les exercices les plus efficaces. Owen et Al. ont trouvé que si toutes les différentes activités physiques mentionnées ci-dessus évaluées dans leur étude étaient efficaces sur la douleur de façon significative, les interventions les plus efficaces seraient la méthode Pilate, le travail en aérobie et le travail proprioceptif, mais le niveau de preuve est faible sur le classement des différentes activités. Owen et Al. ont aussi recherché si ces activités physiques avaient un retentissement objectivable sur l'amélioration des performances musculaires en force et en endurance. Les résultats n'étaient pas significatifs pour l'amélioration en force bien que les exercices contre résistance et de proprioception semblent être les interventions les plus efficaces. Pour l'endurance musculaire, les résultats montraient que tout type d'activités physiques y compris le stretching, étaient en revanche efficaces sur l'endurance musculaire, à l'exception du yoga et du travail proprioceptif et postural (101).

V. Dispositifs pouvant évaluer la force musculaire du tronc

A. Isocinétisme (CONTREX, BIODEX, CYBEX)

L'isocinétisme est une méthode largement utilisée pour tester – et entraîner- différents groupes musculaires. Elle a fait son apparition en Europe à partir de 1980. L'isocinétisme trouve son application pour l'épaule, le genou, le coude, la cheville et le rachis. Concernant le rachis, l'isocinétisme peut être appliqué sur les groupes des extenseurs et fléchisseurs du tronc , ainsi

que sur les rotations. Plusieurs études ont validé la fiabilité des machines d'isocinétisme, en matière de sécurité, de fiabilité des mesures, et de sensibilité au changement (45–50). A la suite de ces publications, l'isocinétisme est considéré comme le *gold standard* de l'évaluation musculaire analytique. C'est ainsi un outil de choix pour évaluer de manière objective et sûre d'éventuelles améliorations apportées à la suite d'un entraînement ou d'une rééducation.

L'isocinétisme consiste à faire réaliser au sujet une contraction musculaire maximale constante en imposant une vitesse constante du mouvement définie au préalable par l'opérateur en angulation par seconde, ainsi que l'amplitude totale du mouvement. La résistance de la machine au mouvement s'auto-adapte à la force développée par le sujet, à partir du moment que la vitesse du mouvement choisie est atteinte. L'isocinétisme permet d'étudier une contraction musculaire concentrique, ou excentrique.

L'isocinétisme peut donc être utilisé en tant que méthode d'évaluation musculaire, et en tant que méthode de rééducation analytique grâce à la répétition des mouvements qui permet de cibler précisément une chaîne musculaire. Il permet de recueillir des paramètres tels que le couple de force, la puissance, le travail maximum, le rapport agoniste/antagoniste (51). Dans la lombalgie chronique, il n'y a pas de consensus pour les protocoles et/ou les vitesses angulaires à utiliser (48). En pratique, il est souvent utilisé une analyse à vitesse lente à 30°/s et une à vitesse rapide à 120°/s. L'analyse des courbes obtenues permet également de dépister des déficits musculaires (sans pour autant que cela ait une valeur diagnostique), la contraction musculaire normale étant représentée par une courbe sans irrégularités. L'analyse des courbes permet aussi d'objectiver la présence ou non d'un bon équilibre entre muscles agonistes et antagonistes. Pour le tronc, le ratio normal flexion/extension doit se situer aux alentours de 0,5-0,7 chez des patients sains non sportifs.

Chez les patients lombalgiques chroniques, des études ont cherché à trouver des facteurs prédictifs de la force musculaire (52). L'étude de Keller et Al. a fait ressortir des corrélations

entre force musculaire en isocinétisme et le genre, l'intensité de la douleur et la superficie du muscle. Mais les résultats étaient nuancés par le fait que l'étude n'a pas pris en compte l'ensemble des facteurs biopsychosociaux et que les corrélations ne suffisaient pas à expliquer les résultats de l'évaluation musculaire pour tous les patients de l'étude. D'autres études se sont penchées sur l'apport de l'isocinétisme dans la rééducation du patient lombalgique (53–56). Il n'a pas été relevé d'effet supérieur de l'isocinétisme en tant que méthode de rééducation seule (53), ou en association avec de la kinésithérapie habituelle (54–56). Des études ont également essayé de caractériser les patients lombalgiques en isocinétisme. Il semble que les patients lombalgiques ont un déficit des extenseurs plus prononcé que ceux des fléchisseurs, pouvant même inverser le ratio fléchisseurs/extenseurs qui peut être supérieur à 1 (57). Enfin, il apparaît que chez les patients lombalgiques, un effet de test-retest est plus marqué que dans la population générale, ce qui implique d'interpréter avec précaution les données de l'isocinétisme s'il n'y a pas eu de familiarisation au préalable avec l'appareil (54). Ce phénomène est expliqué par le fait que les patients lombalgiques peuvent avoir une crainte légitime quant à la machine qui est imposante et la kinésiophobie souvent associée qui leur font craindre une augmentation de leur douleur, ce qui peut minimiser leurs performances lors de la toute première évaluation. Bien que l'isocinétisme représente une méthode de choix, le coût est cependant non négligeable et nécessite la présence d'un opérateur qualifié. Il convient également de respecter les contre-indications à cet exercice qui sont représentées par : une fracture vertébrale récente ou non consolidée, une lésion tissulaire récente, l'incontinence urinaire, l'existence de facteurs de risque cardio-vasculaires non contrôlés, la lombalgie aiguë, la hernie discale récente, l'existence d'une pathologie inflammatoire rachidienne, la grossesse.



Dynamomètre isocinétique CYBEX (Medimex, Sainte-Foy-Les-Lyon, France)

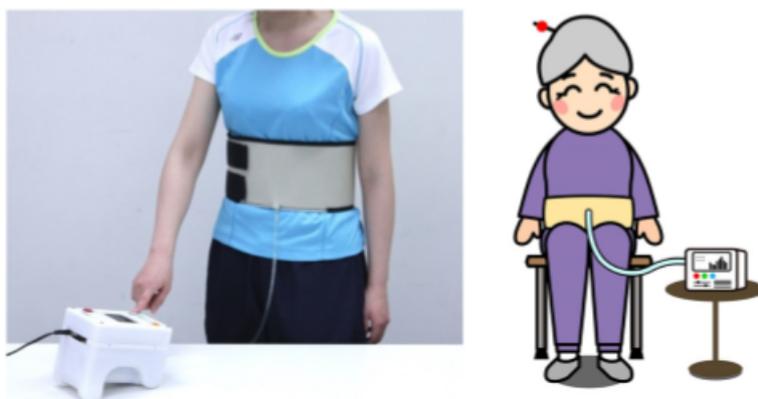
(Source : article original « Évaluation isocinétique de la force et de l'endurance en flexion et extension du tronc chez des adolescents témoins et lombalgiques » par J-C Bernard)

B. Ceinture de renforcement musculaire abdominal

Ce nouvel appareil conçu au Japon par Nippon Sigmoid Co. a été créé pour mesurer la force des muscles abdominaux, et de les renforcer dans le cadre de la lombalgie chronique. Ce dispositif se présente sous forme d'une large ceinture que l'on serre autour de l'abdomen, et repose sur le principe d'un sphingomanomètre, exerçant donc une pression autour de la taille, et calculant la différence de pression entre la pression exercée de base et lors de la contraction volontaire des abdominaux. Un manomètre intégré permet de mesurer la différence entre la pression exercée par l'appareil et le pic de pression provoqué par la réaction musculaire en temps réel et d'avoir un *feedback*. Il présente l'avantage de faire travailler les muscles abdominaux en toutes circonstances, en position assise ou allongée, sans nécessité de faire des mouvements du tronc. Il serait donc particulièrement adapté pour des personnes ayant des capacités motrices diminuées, ou avec une douleur très sévère.

Ce nouveau dispositif a fait l'objet d'une étude au Japon qui a validé la fiabilité de ses mesures (58), et son efficacité en terme de renforcement musculaire sur des sujets sains (59). Une autre

étude a ensuite été réalisée pour comparer la force des abdominaux chez des femmes âgées entre un groupe lombalgique chronique et un groupe témoin, qui montrait un déficit des abdominaux plus élevé dans le premier groupe associé à un risque de chute plus élevé (bien qu'il soit souligné dans ce cas de figure que les autres facteurs de risque de chute n'ont pas été relevés donc on ne peut exclure des biais de confusion) (60). La prochaine étape sera de tester la ceinture sur des patients lombalgiques, et de comparer l'efficacité de l'appareil par rapport à des exercices de renforcement musculaire classiques.



Nippon Sigmax Co., Ltd., Shinjuku-ku, Tokyo, Japan. (Source: article original Kato et Al. (60))

C. Isométrie

1) Autres machines d'évaluation et de renforcement du tronc (Gamme TERGUMED)

On peut aussi retrouver des appareils conçus pour le renforcement musculaire de type musculation ayant des capacités de mesure et d'évaluation précises. Par exemple, la marque Tergumed (Proxomed, Allemagne) a mis au point cinq machines uniquement pour le tronc. Ces appareils sont inscrits parmi les dispositifs médicaux de classe I. L'ensemble de ces machines permettent de travailler sur le rachis dans tous les plans de l'espace (flexion, extension, latéro-flexions et rotations), de manière isométrique et/ou dynamique, en fixant bien le bassin et les

membres. Chaque machine est informatisée et reliée à un logiciel d'analyse permettant de faire des bilans comparatifs, d'ajuster la charge, de choisir le mode isométrique ou dynamique. Ces machines ont fait l'objet de deux études ayant porté sur la fiabilité de leurs capacités de mesure chez des sujets sains (61) et chez des patients lombalgiques chroniques (62). La conclusion de ces deux études mettaient en avant que les machines utilisées avaient une excellente fiabilité pour la mesure en mode isométrique, non opérateur-dépendant, et une bonne fiabilité de mesure d'amplitude rachidienne, à condition que les évaluateurs aient été formés au préalable à la machine. Il n'avait pas été noté d'effet test-retest avec les patients lombalgiques, mais une familiarisation avec la machine était comprise dans le protocole d'étude avant de passer aux véritables tests. L'ensemble des machines de la gamme Tergumed a été concerné par ces deux études. Ces appareils ont par la suite été utilisés dans des études ayant porté sur l'évaluation de l'effet de l'incrémentation de la résistance lors d'exercices de flexion/extension (63,64). Il a été démontré que différents niveaux de résistance étaient requis pour travailler en force, les muscles abdominaux nécessitant de travailler à 70% du moment de force maximum, contre 50% pour les muscles iliocostaux par exemple. Les auteurs mentionnaient tout de même le fait que l'amplitude était mesurée en centimètres sur ces appareils, au lieu d'être mesurée en degrés, ce qui est la norme internationale. Les auteurs rappelaient aussi que les mesures effectuées sur ces appareils sont prises en position assise. Ces deux points sont à prendre en compte si l'on souhaite comparer des résultats obtenus avec Tergumed avec d'autres dispositifs d'évaluation musculaire, tels que les dynamomètres isocinétiques par exemple.

Il existe sur le marché d'autres appareils semblables. On peut citer les produits de la marque David de David Health Solutions Ltd (Helsinki, Suède) qui possède des équipements très similaires conçus également dans le but de se livrer à un programme complet d'entraînement rachidien (65). Il existe aussi des dispositifs de la gamme MedX ((MedX Corporation, Hambourg, Allemagne), qui permettent aussi de réaliser des contractions musculaires

isométriques maximales aux amplitudes de flexion et d'extension maximum (66). Cette gamme de machines ne permet pas d'étudier les inclinaisons latérales.



David Back Training device pour flexion et extension du tronc (Source : proxomed.elitemedicale.fr/tergumed/)

Latéro-flexion par Tergumed.

(Source : proxomed.elitemedicale.fr/tergumed/)



2) *Dynamomètres portables*

Les dynamomètres portables sont d'autres dispositifs pouvant mesurer la force des muscles qui ont l'avantage d'être peu encombrants et faciles d'utilisation. Les dynamomètres portables ne peuvent mesurer qu'un seul type de contraction musculaire qu'est la contraction isométrique. Il

y a tout de même des précautions à prendre si l'on veut effectuer une évaluation valable. Par exemple, la méthode d'utilisation doit être bien détaillée pour qu'elle soit reproductible. L'utilisation de ces appareils sur les groupes musculaires les plus puissants est moins fiable, et la force exercée par l'évaluateur sur la partie du corps que l'on veut tester doit être bien perpendiculaire au segment, constante, et plus importante que la force exercée par le muscle que l'on teste, tout en gardant à l'esprit de stabiliser ou de fixer le reste du corps pour éviter toute compensation (67). Or, le tronc est justement un ensemble de groupes musculaires puissants.

Plusieurs études et une revue de la littérature (67) ont analysé la comparaison de ces dynamomètres avec l'isocinétisme pour les membres et les petites articulations, et ont validé la fiabilité de leurs mesures. Les études s'étant ensuite intéressées à la fiabilité de leur capacité de mesure pour les muscles du tronc par rapport à l'isocinétisme sont venues plus tard (68,69). Il semble que si l'on souhaite réaliser un recueil de mesure fiable du tronc, les dynamomètres doivent souvent incorporer un support fixe qui permet de bien stabiliser le corps et d'isoler spécifiquement les muscles du tronc que l'on souhaite tester. Certains de ces appareils permettent même de se passer de l'intervention manuelle de l'évaluateur car le dynamomètre est intégré au support. Des dynamomètres isométriques intégrés à des structures existent sur le marché, par exemple le Dr Wolff BC ou le Triaxial (Triaxial Isometric Measurement of Muscle Strength) (70). En revanche, cela les rend peu maniables et aussi encombrants que les machines à isocinétisme. Jubany et Al. ont ainsi créé un support métallique plus léger et facilement mobile tout en incorporant un dynamomètre (MicroFet2). Leur étude révèle que la fiabilité de ce dispositif est très bonne en comparaison avec le Dr Wolff BC qui est considéré dans cette étude comme la référence des dynamomètres isométriques. L'étude de De Blaiser et Al. qui utilise le MicroFet2 va aussi dans le sens d'une bonne fiabilité, à la fois inter et intra-sujets chez une population saine d'athlètes, mais à la condition d'effectuer une évaluation bien

standardisée avec le tronc surélevé à 30° de flexion par rapport au plan du sol ou de la table, et pour l'extension à 0°, tout en veillant à ne pas recruter d'autres muscles synergiques, quitte à immobiliser une autre partie du corps du patient. Si d'autres études confirment ces mêmes qualités, les dynamomètres portatifs pourraient donc être une bonne alternative à l'isocinétisme pour l'évaluation musculaire du tronc, mais à condition qu'ils aient comme avantage d'être moins encombrants, en plus de leur coût qui est bien moindre que les machines à isocinétisme.



Dynamomètre électronique MicroFet 2 (Hoggan Health Industries)

(Source : biometrics.fr)

Dynamomètre Dr Wolff BC (Sports and prevention GmbH, Arnsberg, Germany)

(Source : dr-wolff.de)





Support en acier démontable avec dynamomètre intégré (Jubany et Al.)

D. Électrostimulation

1) Description

L'électrostimulation trouve son application dans la vie courante pour l'entraînement sportif, ainsi qu'en rééducation, où l'électrostimulation fait partie de l'électrothérapie au sens large. Le matériel d'électrostimulation est accessible au grand public sans nécessité de prescription médicale via des marques déposées, la plus connue en France étant Sport-Elec (Normandie, France). Dans le domaine de la rééducation, les stimulateurs de la marque Cefar® sont couramment utilisés. L'électrostimulation fonctionne grâce à des électrodes cutanées et un boîtier de stimulation, et éventuellement des accessoires optionnels (ceinture, combinaison...). L'électrostimulation peut stimuler les fibres musculaires et les nerfs. Elle se divise en plusieurs types de stimulation : la neuro-myo-électrostimulation (NMES) et la neurostimulation électrique

transcutanée à visée antalgique (TENS). Nous n'aborderons dans ce paragraphe que l'effet sur les muscles et le courant de type NMES.

2) Mécanisme d'action

L'électrostimulation consiste à envoyer une impulsion électrique locale via une électrode entraînant la dépolarisation des axones moteurs en regard, qui provoque donc une contraction musculaire sans faire participer le système nerveux central. Il apparaît aussi que les contractions induites par électrostimulation aient une demande métabolique et cardiorespiratoire plus importante que les contractions volontaires (71). Les boîtiers de stimulation ont enregistré en leur mémoire interne plusieurs programmations qui correspondent à différents types de courants, c'est-à-dire différentes intensités de courant (en milliampères) ou de fréquence (en Hertz). Jouer sur la fréquence permet de recruter des fibres musculaires différentes, et moduler l'intensité du courant influe sur l'intensité de la stimulation. Plus la fréquence utilisée est haute, plus la contraction musculaire est importante. Les fréquences hautes permettent donc de travailler le muscle en force, tandis que les basses fréquences améliorent plutôt l'endurance.

3) Indications et contre-indications

Les bienfaits de l'électrostimulation sur les muscles sont l'amélioration des caractéristiques musculaires (tonus, volume, force) (72), l'amélioration de la récupération musculaire. Elle présente aussi l'avantage de pouvoir être pratiquée à tout moment.

Ses indications sont multiples, elle peut être utilisée pour la conservation ou la récupération du volume musculaire après immobilisation prolongée (71), et l'amélioration musculaire chez tout

type de population saine (73) comme chez des patients porteurs de lésion du système nerveux central ou périphérique.

Il existe peu de contre-indications. Il s'agit principalement des appareils électromagnétiques implantés tels que les pacemakers et la grossesse. La zone antérieure du cou est également déconseillée, de par la proximité du sinus carotidien.

4) Limites de l'électrostimulation

Les limites de cette technique résident dans le fait que les unités motrices recrutées ne peuvent qu'être celles situées à la superficialité du muscle et sont limitées à la taille de l'électrode cutanée. On peut donc difficilement stimuler un muscle en entier (sauf si l'on applique l'électrode à proximité d'un tronc nerveux, car de ce fait plusieurs axones seront stimulés (74). Cependant, plus l'intensité de la stimulation est élevée, plus on recrute de fibres en profondeur, mais cela implique également que les personnes de forte corpulence auront moins de bénéfices car la stimulation aura plus de mal à atteindre les muscles. L'autre limite conséquente de cette technique est l'accroissement de la fatigabilité des fibres stimulées, car à l'inverse de la contraction volontaire qui recrute en premier lieu les fibres les plus résistantes à la fatigue, puis dans un second temps des fibres moins résistantes, la stimulation électrique agit en même temps sur toutes les fibres qu'elle peut atteindre. De plus, là où la contraction volontaire permet de varier dans le recrutement des fibres pour justement optimiser le rendement, les fibres musculaires stimulées électriquement étant toujours les mêmes, on atteint plus vite leur seuil de fatigabilité, car l'excitabilité des axones moteurs diminue au fur et à mesure d'une stimulation répétée (73). Enfin, une autre limite de l'électrostimulation réside dans l'inconfort généré par l'impulsion électrique, qui est d'autant plus inconfortable que l'intensité de stimulation est forte.

5) Pistes d'améliorations futures

Enfin, des pistes d'amélioration de la stimulation électrique périphérique sont en cours pour contrer la fatigabilité et le recrutement trop sélectif, telles que l'alternance de stimulation entre corps musculaire et tronc nerveux, la stimulation alternée entre plusieurs sites d'un même muscle, l'accroissement automatique et progressif de l'intensité de stimulation pour rallonger le délai avant le seuil de fatigue, l'intégration de schémas de décharges similaires à celui du système nerveux central tels que les décharges en doublets ou triplets (74).

6) Place de l'électrostimulation dans le renforcement musculaire du rachis

Concernant la littérature, l'ensemble des travaux relève d'une efficacité modeste, et sa supériorité par rapport à d'autres techniques de renforcement musculaire n'est pas démontrée (71). En revanche, beaucoup d'études ayant porté sur les membres inférieurs, et plus particulièrement le muscle quadriceps, ont trouvé des résultats prometteurs lorsque de l'entraînement physique était couplé à l'électrostimulation (75).

Si l'on s'intéresse spécifiquement au tronc, des travaux avec des résultats optimistes ont été effectués pour les muscles de la paroi abdominale (76–79). Huang et Al ont trouvé également une bonne amélioration significative statistiquement et cliniquement sur de multiples paramètres sur les muscles grands droits de l'abdomen après 8 semaines d'électrostimulation sur des sujets sains (80). Dans un autre domaine de la rééducation, des travaux ont montré que l'électrostimulation sur les muscles spinaux (extenseurs thoraciques et lombaires) et/ou sur la paroi abdominale associée à un programme de renforcement du tronc chez des patients hémiplegiques à la suite d'un AVC améliorait l'équilibre comparé à l'électrostimulation seule ou le programme de ré-entraînement seul (81,82). Quelques études se sont aussi intéressées à la

lombalgie commune, mais il est pour l'instant trop tôt pour pouvoir établir l'intérêt de l'apport de la NMES dans cette pathologie. Ainsi, si Hicks et al ont aussi retrouvé de meilleurs résultats pour l'association de l'électrothérapie et du renforcement physique sur la douleur et sur des évaluations fonctionnelles (vitesse de marche, Timed-up and go Test, Index d'Oswestry) chez des personnes âgées lombalgiques chroniques, ces résultats doivent être interprétés avec prudence, car le groupe comparatif n'avait réalisé que des interventions passives avec des thérapeutiques par la chaleur, des ultrasons, massages et étirements (83).

Pugliese et Al ont publié une étude de cas où l'on retrouvait là encore de bons résultats de cette association des deux techniques chez une femme âgée lombalgique (84). En revanche, une étude rétrospective n'a pas pu conclure sur l'efficacité de la stimulation électrique dans la lombalgie, malgré une petite tendance à de meilleurs résultats avec la NMES pour l'évaluation de la douleur et sur les scores de questionnaires d'incapacité, mais aucun résultat n'était significatif (85), tandis qu'une autre étude retrouvait une amélioration de la douleur associée à une amélioration de leur surface des muscles spinaux et abdominaux à l'échographie (86). Le muscle multifide et son intérêt dans le reconditionnement du dos chez les lombalgiques chroniques a été la cible de certaines études, qui ont révélé qu'il était possible de le stimuler et d'augmenter son volume grâce à cette technique (87,88), ce qui peut être prometteur dans la lombalgie chronique, du fait du rôle stabilisateur important de ce muscle (89).



Image de gauche : boîtier d'électrostimulation

Image de droite : application de l'électrostimulation en lombaire



PROTOCOLE D'ETUDE

I. Objectif de l'étude

L'objectif général de l'étude consiste à étayer les données objectives sur le dispositif innovant rachidien Atlas afin d'obtenir plus d'outils concernant son apport en rééducation du dos chez les lombalgiques chroniques. Le dispositif Atlas n'a pas encore fait l'objet d'étude sur son mode renforcement musculaire, ni sur son mode perturbateur. Ce protocole ne concernera que le mode renforcement musculaire. Nous pensons que la résistance induite par l'appareil dans ce mode sera vraisemblablement source d'une dépense énergétique importante lors d'exercices physiques qu'il conviendrait d'objectiver et de comparer à des exercices physiques sans Atlas.

A. Objectif principal de l'étude

L'objectif principal est de préciser et de comparer la consommation d'oxygène (VO₂) lors d'exercices réalisés avec et sans le dispositif Atlas entre deux séries d'exercices identiques, chez des volontaires sains.

B. Objectif secondaire de l'étude

L'objectif secondaire consiste à se servir des résultats sur la dépense énergétique aérobie pour ajuster l'élaboration future de programme de rééducation avec le dispositif.

II.Schéma de l'étude

Il s'agira d'une étude comparative expérimentale, prospective. Les tests auront lieu sur le site d'Eurasport. Elle consistera en la réalisation de deux séries d'effort avec alternance de flexions et d'extensions du tronc pour chaque participant. Chaque série sera réalisée pendant une durée de 3 minutes mesurées avec l'aide d'un chronomètre. Une série sera réalisée avec le dispositif Atlas, et l'autre série sera réalisée sans dispositif. Un temps de repos sera respecté entre chaque série jusqu'au retour à la fréquence cardiaque de repos. La fréquence cardiaque et la tension artérielle seront prises avant de commencer la première série. La fréquence cardiaque initiale sera ainsi considérée comme la fréquence cardiaque de repos. Le fait de commencer avec ou sans le dispositif sera randomisé. Pendant l'effort, les participants porteront un dispositif de mesure portatif d'échanges gazeux (MetaMax® 3B, Cortex, Germany). La fréquence cardiaque sera reprise à l'issue de chaque série ainsi que la fréquence respiratoire et la tension artérielle.

Le dispositif sera ajusté individuellement à la taille de chaque participant selon la notice d'utilisation du fabricant et le niveau de résistance sera le même pour tous les participants. Deux niveaux de résistance seront testés, moyenne résistance et forte résistance.

Un temps de familiarisation avec le dispositif sera respecté jusqu'à ce que les volontaires déclarent être prêts à effectuer la série. L'amplitude des mouvements devra être la même pour tous les participants. Il sera rappelé aux participants de dépasser le seuil de la verticale lors du mouvement d'extension de tronc. Un examen médical préliminaire comprenant une auscultation cardio-pulmonaire et un interrogatoire permettra de s'assurer de l'absence de contre-indications aux tests par les médecins responsables de l'étude.

Les données démographiques recueillies seront l'âge, le sexe, la taille et le poids, et l'indice de masse corporel.

Une demande sera envoyée au comité d'éthique de la recherche de l'Université de Lille (cf annexe 2).

III. Description de la population

Les sujets ont été recrutés parmi des étudiants en STAPS sur la base du volontariat. La recherche de volontaires sera effectuée par M. Nicolas Olivier, enseignant de l'université de Lille en STAPS à Eurasport. Une information écrite leur sera remise sur le déroulement de la procédure de test.

A. Critère d'inclusion

Tout volontaire âgé de minimum 18 ans peut participer à l'étude.

B. Critères d'exclusion

Les critères d'exclusion comportent les contre-indications au port du corset détaillées précédemment (cf partie III.B.), ainsi que :

- la présence de rachialgies,
- l'existence de déformation thoracique ou abdominale empêchant la bonne mise en place du corset,
- la présence d'antécédent personnel de pathologies cardiaques ou pulmonaires à risque ou non contrôlées.

C. Calcul du nombre de sujets nécessaires

Du fait de l'absence de test au préalable sur plusieurs sujets, nous ne pouvons calculer le

nombre de sujets nécessaires car nous ne possédons pas d'écart-type nécessaire à ce calcul. Un test préliminaire permet d'envisager une hypothèse d'augmentation de la VO₂ de presque 50% (cf ci-dessous) avec le dispositif, mais ne permet pas d'avoir d'écart-type. Ainsi, nous choisissons ici d'inclure un minimum de 15 sujets, qui représente un nombre permettant d'obtenir des résultats significatifs dans d'autres études ayant testé des exosquelettes ou de nouveaux dispositifs de tronc (24).

IV. Critère de jugement

A. Critère de jugement principal

Le critère de jugement principal choisi pour évaluer la dépense métabolique aérobie est la mesure du débit de la consommation en dioxygène (VO₂) en ml/min/kg.

B. Critères de jugement secondaires

Les critères de jugement secondaires seront la fréquence cardiaque en battements par minute, la fréquence respiratoire en cycles par minute, le débit de consommation en dioxyde de carbone (VCO₂) en ml/min/kg, et la tension artérielle en millimètres de mercure (mmHg). Le recueil de la VCO₂ permettra également de calculer le quotient respiratoire (VCO₂/VO₂) et de repérer éventuellement les seuils ventilatoires.

V. Analyse statistique

L'analyse consistera en une analyse descriptive et comparative des données quantitatives

recueillies. Le test utilisé sera le test t de Student pour les données quantitatives continues. Le seuil de significativité sera fixé à $p \leq 0,05$. En cas de conditions non-paramétriques, il pourra être utilisé le test de Wilcoxon ou le test de Mann-Whitney.

VI. Étude pilote sur un sujet

Le test a été réalisé sur un sujet sain, n'ayant aucun critère d'exclusion. Le sujet était un homme âgé de 47 ans. Le niveau de résistance était de niveau moyen. Si les échanges gazeux ont été relevés, les autres critères de jugement secondaires (fréquence cardiaque, fréquence respiratoire et tension artérielle) n'ont pas été recueillis. L'épreuve a été menée jusqu'à deux minutes avec Atlas et jusqu'à trois minutes sans Atlas. Nous pouvons constater qu'au terme de l'exercice, la valeur de la VO₂ est supérieure avec Atlas (1420,5 ml/min) que sans (951,1 ml/min), soit une augmentation de 49% lorsque l'exercice est réalisé avec Atlas (cf figure 1). Concernant le VCO₂, celle-ci augmente également de 81% avec Atlas (cf figure 2). Le calcul du quotient respiratoire en fin d'exercice est de 0,74 avec Atlas et de 0,61 sans Atlas.

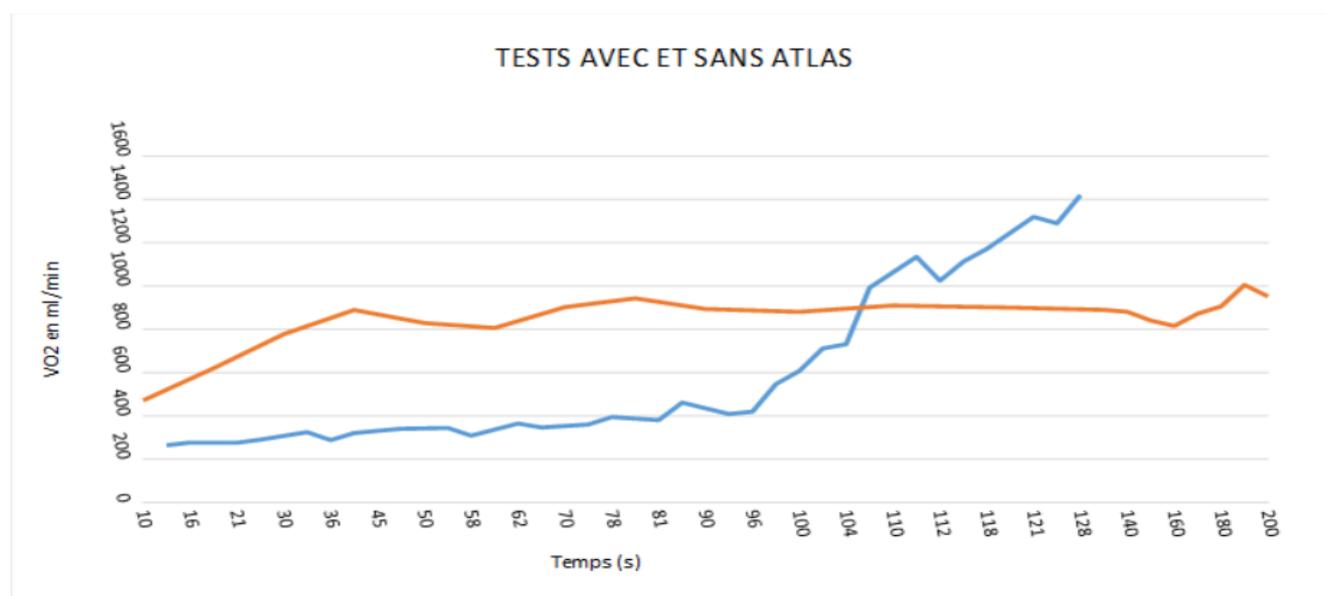


Figure 1 : recueil du VO₂ avec sans Atlas au cours du temps. La courbe bleue représente l'épreuve avec Atlas, et la courbe rouge le même effort sans Atlas.

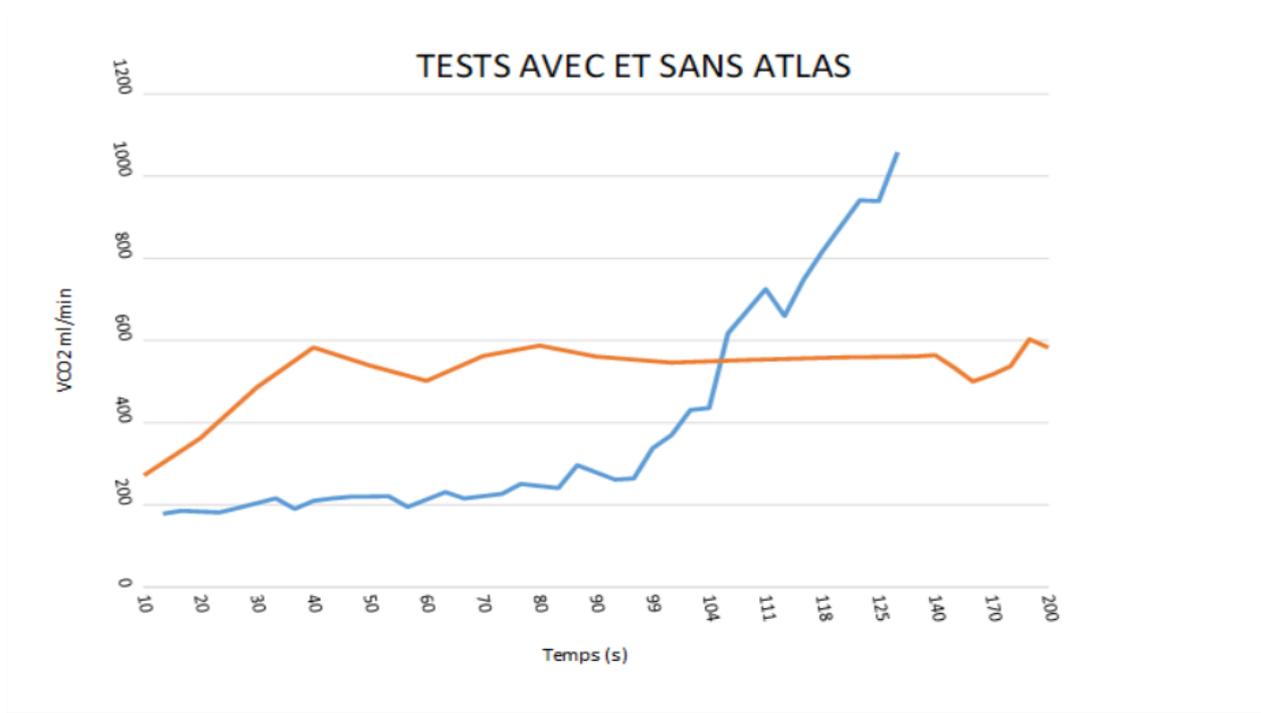


Figure 2 : recueil du VCO2 en fonction du temps. La courbe bleue représente l'épreuve avec Atlas, et la courbe rouge le même effort sans Atlas.

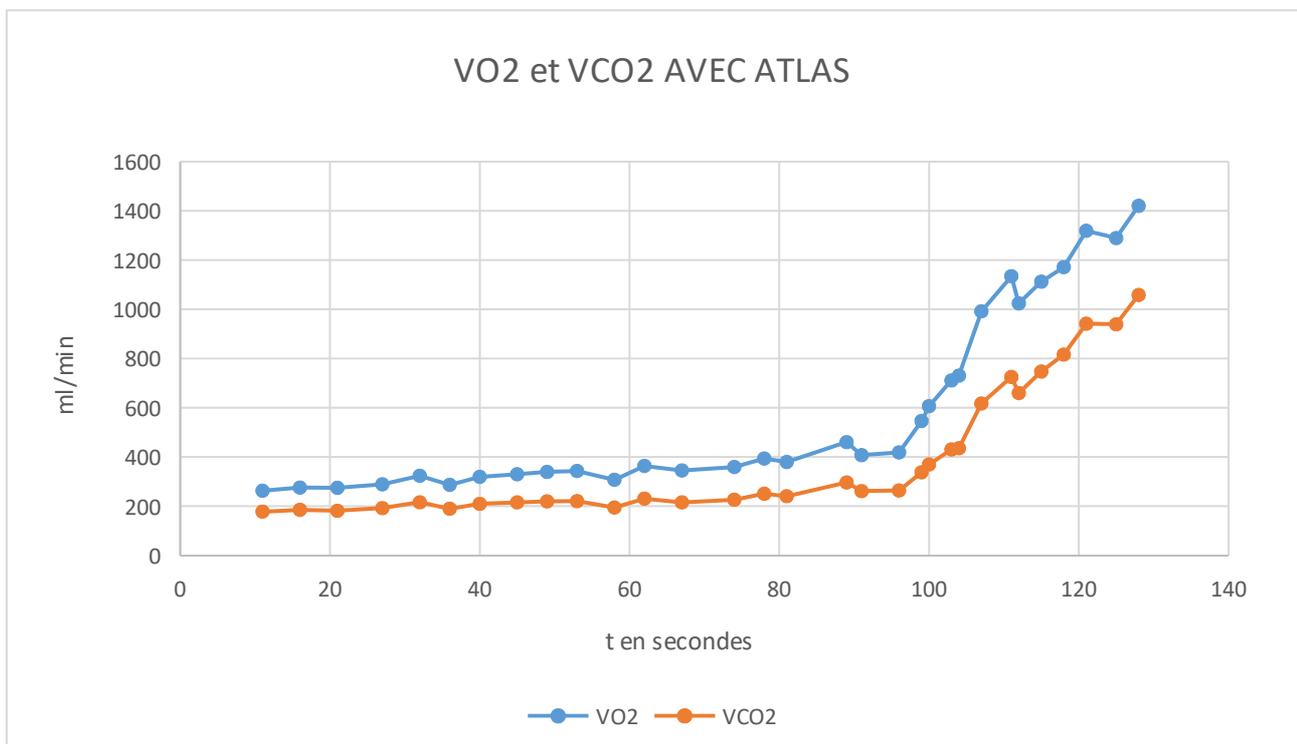


Figure 3 : VO2 et VCO2 en simultané avec Atlas

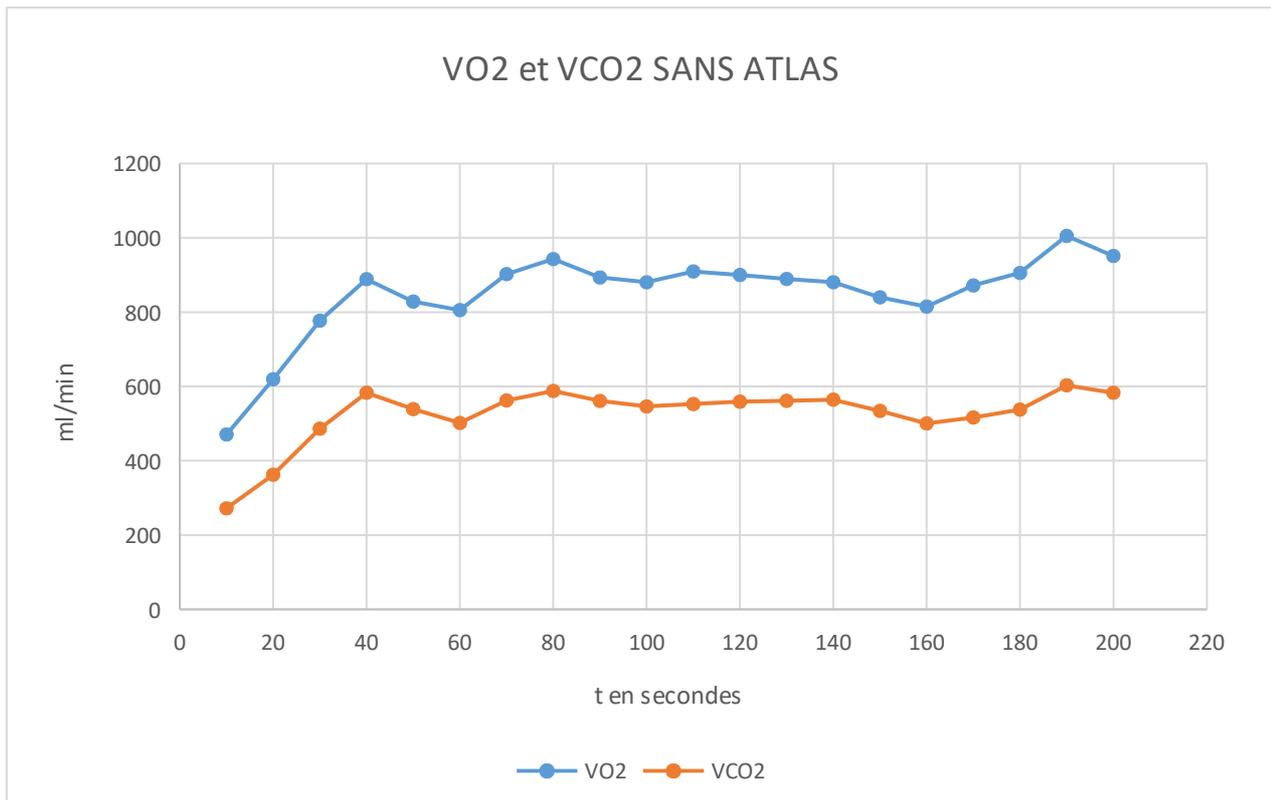


Figure 4 : VO2 et VCO2 en simultané sans Atlas.

VII. Hypothèses sur les résultats attendus

Au vu de ces résultats préliminaires sur un seul sujet, il est attendu que l'utilisation d'Atlas dans ce protocole montre une augmentation du VO2 maximum obtenu au terme de l'exercice d'environ 50% et que cette augmentation sera atteinte plus rapidement que sans Atlas. L'hypothèse principale est donc que la dépense énergétique aérobie sera plus sollicitée avec Atlas. Concernant les critères de jugement secondaires, même sans données préliminaires, nous nous attendons à ce que la fréquence cardiaque maximum à l'effort et la fréquence respiratoire soient plus élevées et augmentant plus rapidement avec Atlas. La VCO2 devrait logiquement suivre le même schéma. Nous partons aussi de l'hypothèse que plus le niveau de

résistance du dispositif augmente, plus l'augmentation des différentes variables recueillies s'accéléra, et donc que le VO₂ max, VCO₂ max, la fréquence respiratoire et la fréquence cardiaque maximum seront atteints sur des délais plus courts qu'avec une résistance moyenne.

VIII. Discussion

A. Choix des variables recueillies

Le VO₂ est le débit de consommation en dioxygène. Il se définit comme étant égal à la différence entre le débit de dioxygène inspiré et le débit de dioxygène expiré. C'est un concept qui fait l'objet d'un consensus de la communauté scientifique pour la détermination de l'aptitude aérobie d'un sujet (105). Tout comme le VO₂, la fréquence cardiaque augmente de façon proportionnelle à l'intensité de l'exercice jusqu'à atteindre une fréquence cardiaque maximale et permet de mieux caractériser un effort. Quant à la fréquence respiratoire, celle-ci augmente aussi l'intensité de l'effort et permet de caractériser l'état d'essoufflement. Il est considéré qu'à partir de 45 cycles par minutes, il apparaît un état d'essoufflement (105). Le VCO₂, le débit de rejet de gaz carbonique, est aussi un paramètre très intéressant à étudier dans l'analyse des échanges gazeux ; en effet, couplé au VO₂, il permet de déterminer les seuils ventilatoires qui sont les seuils anaérobies de l'effort et permettent de calculer le quotient respiratoire qui doit se situer autour de 0,7 à 0,8 pour un effort faible ou de repos en aérobie et correspond à une consommation prépondérante des lipides. Entre 0,8 et 1, il y a utilisation concomitante de lipides et de glucides correspondant à un effort aérobie sous-maximal. Un quotient respiratoire qui passe au-dessus de 1 montre que la balance aérobie/anaérobie est déséquilibrée et que l'anaérobie prend le pas sur le métabolisme aérobie, c'est-à-dire que le sujet excréterait plus de CO₂ qu'il ne consommerait d'O₂, et donc que le sujet arrive à épuisement. En effet, les valeurs

du quotient respiratoire sont étroitement corrélées avec les mécanismes de lipolyse et de glycolyse sollicités lors d'un effort. Pour rappel, la lipolyse consomme plus de dioxygène qu'elle ne rejette de dioxyde de carbone. La glycolyse quant à elle est parfaitement équilibrée entre consommation de dioxygène et rejet de dioxyde de carbone.

Quant aux seuils ventilatoires, ils sont le reflet de l'accumulation de l'acide lactique produit lors d'un effort. Les seuils ventilatoires sont au nombre de deux. Le premier seuil est considéré comme le début de l'accumulation du lactate dans le sang, avec une concentration plasmatique évaluée à 2 mmol/l. Le deuxième seuil ventilatoire correspond quant à lui à une concentration plasmatique de lactate à 4 mmol/l, et peut être considéré comme le dernier point d'accumulation avant l'arrêt de l'effort. Les seuils ventilatoires dans la pratique sportive peuvent être modifiés et utiles dans l'entraînement sportif. Par exemple, travailler efficacement en aérobie et en endurance permettra de retarder l'apparition du premier seuil ventilatoire et donc d'améliorer les performances. Les seuils ventilatoires se situent en général vers 50 à 60% du VO₂ max pour le premier seuil, et vers 80% du VO₂ max pour le deuxième.

Ces paramètres ont fait la preuve de leur utilité dans l'analyse de la physiologie cardio-respiratoire d'un effort ou de la pratique sportive.

B. Discussion sur les mesures obtenues dans le test préliminaire sur un sujet

Plusieurs points méritent une attention dans les mesures réalisées sur un sujet et permettront d'aider à améliorer l'étude à venir.

Tout d'abord, le temps de l'épreuve est trop court pour permettre d'atteindre le VO₂ maximum.

On peut constater avec la cinétique de la courbe que même avec Atlas (figure 1), le VO₂ n'atteint pas de plateau.

A titre d'exemple, les épreuves d'effort en pratique ont une durée d'environ dix minutes. De plus,

le calcul du quotient respiratoire montre que le niveau de cet exercice pour le sujet était moyennement voire faiblement intense à la fin de l'exercice. Cela amène des interrogations sur la durée optimale du protocole chez des sujets sains sportifs. Bien qu'il ne s'agira pas ici de réaliser une véritable épreuve d'effort en tant que telle, la durée de l'exercice pourrait potentiellement être fixée à 5 minutes. Il serait ensuite peut-être possible à l'issue de l'étude et au vu des différentes visualisations de courbe de prédire et de modéliser une durée à laquelle on atteindra les seuils ventilatoires ou le VO₂ maximum ou encore la fréquence cardiaque maximale, en sachant les valeurs théoriques que l'on retrouve chez la plupart des gens, à savoir environ 50 ml/min/kg chez des hommes sportifs, et 40 ml/min/kg chez des femmes sportives (83).

Également, la comparaison des courbes de VCO₂ et de VO₂ permet de constater que les seuils ventilatoires ne sont pas atteints, le premier seuil ventilatoire étant généralement perçu par un décrochage de la courbe du VCO₂ qui augmente alors plus vite que la courbe de VO₂, pour ensuite finir par l'atteindre lors du deuxième seuil ventilatoire. Ici, nous ne constatons pas de décrochage d'une courbe par rapport à l'autre et elles restent parallèles entre elles. Si nous maintenons donc approximativement la même durée d'exercice pour les volontaires sains qui seront sportifs, nous pouvons nous attendre à ce que les seuils ventilatoires ne soient pas atteints, et que l'intensité de l'exercice sera au mieux moyenne avec une durée d'épreuve de 3 minutes. Par ailleurs, une durée d'exercice courte de 3 minutes, consistant en un effort intense, est plus susceptible de faire fonctionner avant tout la filière anaérobie ayant la capacité de produire beaucoup d'énergie pendant une durée courte, pouvant aller jusqu'à deux minutes environ, avant que la filière aérobie ne prenne le relai, et assure une meilleure tenue dans le temps de l'effort plutôt que de la puissance. Si tel est bien le cas de figure après l'étude, alors la voie aérobie ne pourra pas vraiment être explorée en tant que telle, et il faudra plutôt s'intéresser au VCO₂ pour pouvoir faire des interprétations plus valables.

Concernant la cinétique des VO₂ et VCO₂ sans Atlas, on observe que celles-ci ont une pente initiale beaucoup plus importante avant d'atteindre cette fois-ci un plateau. L'accélération initiale de la pente et l'aspect de la courbe en général posent plusieurs questions. Nous pouvons énoncer le fait que dans le cas de ce sujet, l'évaluation sans Atlas a été réalisée après l'évaluation avec Atlas, et qu'il est possible que le temps de récupération entre les deux épreuves n'ait pas été assez long, ou qu'il y ait eu un phénomène d'habituation à ce type d'effort, aussi, le métabolisme énergétique a été plus vite sollicité et plus rapide à se relancer. La randomisation au préalable de l'ordre dans lequel les exercices seront effectués permettront d'étayer et d'apporter des explications à ce phénomène, et voir s'il est reproductible.

Quant au plateau des VO₂ et VCO₂ obtenu au bout d'environ 1 minute, il met en évidence que l'effort sans Atlas est un effort d'intensité trop faible pour augmenter davantage les débits. En effet, si l'on rapporte le VO₂ maximum atteint au terme de l'exercice au poids du sujet, les valeurs obtenues sont de 17,7 ml/min/kg avec Atlas et 11,9 ml/min/kg sans Atlas, ce qui, pour l'un comme pour l'autre, est nettement en dessous de la norme pour un sujet masculin sédentaire, se situant plutôt autour de 35 à 40 ml/min/kg. Pour toutes ces interrogations, les valeurs obtenues sans le dispositif sont donc non interprétables, et ne peuvent écarter une erreur de mesure.

En revanche, même si ces valeurs sont faibles, nous pouvons tout de même constater que le VO₂ maximum en fin d'épreuve est tout de même bien plus important avec Atlas que sans, et ce pour une durée d'exercice plus courte de 1 minute. De plus, les débits étaient tous deux en phase de croissance rapide au moment où l'exercice s'est terminé avec Atlas, là où l'effort semblait stagnant en intensité nécessaire pour réaliser l'exercice sans Atlas. Cela tend à conforter notre hypothèse première qu'un effort fourni avec Atlas est beaucoup plus coûteux énergétiquement parlant. Si cela se confirme à la suite du protocole, cela devra être pris en compte pour introduire l'Atlas dans des protocoles de rééducation. Nous pourrions imaginer par

exemple de l'utiliser sur des durées courtes, en fractionné, en alternant par exemple entre le mode renforcement et les autres modes du dispositif.

L'exercice proposé dans ce protocole ne peut donc en aucun cas être considéré comme une épreuve d'effort, car trois minutes de flexion et extension ne suffiront certainement pas pour atteindre des valeurs maximales ni les seuils ventilatoires. Cette étude n'a pas pour ambition de réaliser un simili d'épreuve d'effort. Il s'agit d'une étude pilote qui ne peut donc donner qu'une estimation sur la différence retrouvée dans les échanges gazeux et donc dans la réserve métabolique nécessaire à recruter quand on utilise l'Atlas.

C. Limites du protocole

Ce protocole comporte plusieurs limites qu'il convient de souligner et de prendre en compte. Premièrement, il s'agit d'une étude pilote de faible puissance. Même en cas de résultats significatifs, la généralisation des résultats ne pourra réellement s'envisager. Concernant la population de l'étude, ce protocole cible des volontaires sains parmi les étudiants en STAPS à Euraspport. Il s'agira donc d'une population de tranche d'âge jeune, en bonne santé, et bien entraînée physiquement. Il ne s'agira donc pas d'une population qui ressemble aux patients lombalgiques chroniques, qui en général, font partie d'une tranche d'âge plus élevée et très étendue, et qui sont souvent plus sédentaires. Ainsi il est probable que les valeurs quantitatives que l'on obtiendra lors du recueil de données avec ce type de population ne soient pas représentatives de ce qu'on obtiendrait sur des patients. Nous devons nous attendre à obtenir des valeurs sans doute plus hautes des VO_2 et VCO_2 , des fréquences cardiaques éventuellement plus basses au repos comme à l'effort. De plus, les lombalgiques chroniques ont très souvent une kinésiophobie marquée, ce qui réduirait sans doute l'amplitude des mouvements effectués, avec ou sans Atlas. Or, si les mouvements réalisés sont d'amplitude

réduite, alors la demande énergétique le sera aussi. Cependant, même si les valeurs diffèrent entre étudiants sains et patients lombalgiques, la proportion et l'ordre de grandeur des différences de résultats que l'on retrouvera est tout de même intéressante, et pourra tout de même être transposable sur des patients lombalgiques chroniques. D'autre part, il s'agit d'analyser la comparaison de la consommation d'oxygène avec et sans Atlas pour confirmer le travail musculaire engagé avec Atlas. Il n'est pas envisagé d'utiliser les mêmes séries d'exercices et au même rythme pour la rééducation de personnes lombalgiques.

Concernant la méthode de l'épreuve, le rythme (fréquence) des mouvements était fixé, mais nous pouvons relever qu'il n'est pas possible de fixer complètement l'amplitude en flexion et en extension des participants comme il serait possible de le faire lors d'un test isocinétique par exemple. Il se peut donc qu'il y ait une variabilité dans les amplitudes effectuées selon les participants et donc dans l'effort fourni. En effet, plus les participants iront loin en amplitude, plus les débits de consommation de dioxygène et de rejet de dioxyde de carbone vont augmenter par rapport à ceux qui auront une course d'action plus petite. Cela sera d'autant plus vrai lors de l'exercice sans Atlas, car si les actionneurs sur l'Atlas permettront tout de même de fixer les amplitudes mécaniquement, la réalisation de flexion et extension de tronc sans Atlas ne pourra pas du tout être fixée objectivement. Cela risque donc d'induire un biais de mesure. La solution pour ce protocole sera la surveillance par un évaluateur qui corrigera oralement les participants sur leurs mouvements. Un repère visuel pourra éventuellement être intégré. L'évaluateur devra de préférence être toujours le même pour limiter le risque de biais. Si ces conditions sont réunies, l'écart entre les participants pourrait être minimisé, celui-ci pourrait être d'une vingtaine de degrés au maximum. Ce possible biais pourrait être contrôlé à l'aide d'un laboratoire d'analyse 3D du mouvement.

Il est aussi à noter que le type d'effort demandé dans cet exercice est un effort soutenu, en force. Or, la rééducation de la lombalgie chronique a comme objectifs de travail le renforcement

musculaire du tronc, mais aussi le renforcement en endurance. Il ne s'agit pas ici d'un travail en endurance. Cela peut donc impliquer que l'Atlas, en mode renforcement, ne pourra pas cibler ce type de travail là et ne pas être efficace pour l'endurance du rachis.

De plus, l'exercice proposé n'explore qu'un seul des trois axes de la mobilité rachidienne. Nous n'obtiendrons pas de données sur l'inclinaison latérale et la rotation. Celles-ci pourront faire l'objet de travaux ultérieurs. Enfin, il serait intéressant d'incorporer par la suite les applications du logiciel créé pour Atlas, et envisager s'il serait possible de réaliser un protocole similaire mais avec un des *serious games* conçus pour Atlas par exemple, bien que dans ce cas de figure il n'y aura pas de comparaison sans Atlas. L'interaction avec un *serious game* présente l'intérêt de susciter la motivation du sujet à s'engager dans l'exercice. Un *feed-back* visuel lié à l'intensité de l'effort permet de situer cet effort en regard d'un objectif à atteindre.

CONCLUSION

Le dispositif Atlas est un appareil récent s'inscrivant parmi les exosquelettes de tronc et plus particulièrement d'assistance lombaire. Il s'agit du premier exosquelette de la sorte à avoir été conçu dans le but d'être un support actif dans la rééducation des personnes lombalgiques. En effet, il combine les capacités de compensation rachidienne avec celles de renforcement musculaire. Cette innovation en fait un outil prometteur dans le domaine de la médecine physique et de réadaptation. C'est pourquoi l'élaboration de travaux de recherche est nécessaire pour évaluer son efficacité.

Nous avons établi ici un protocole d'étude expérimentale pour évaluer la consommation d'oxygène et l'effort fourni lors de l'utilisation de ce dispositif. Les résultats nous permettront indirectement d'avoir une vision sur le travail musculaire fourni par le tronc avec Atlas.

Au vu des résultats préliminaires sur un sujet, nous attendons de ce dispositif une augmentation de la consommation de dioxygène d'environ 50% lorsqu'il est porté.

Ce protocole sera réalisé pendant l'année universitaire 2020-2021. Par la suite, il faudra envisager des travaux de recherche sur des patients lombalgiques, ceci dans le but d'introduire le dispositif Atlas dans des protocoles de rééducation.

BIBLIOGRAPHIE

1. Lombalgie. Statistique - Risques - INRS. Disponible sur: <http://www.inrs.fr/risques/lombalgies/statistique.html>
2. Lombalgie chronique de l'adulte et chirurgie [Internet]. Haute Autorité de Santé. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/c_2615316/fr/lombalgie-chronique-de-l-adulte-et-chirurgie
3. van Tulder M, Koes B, Bombardier C. Low back pain. *Best Pract Res Clin Rheumatol.* déc 2002;16(5):761-75.
4. Prise en charge masso-kinésithérapique dans la lombalgie commune : modalités de prescription [Internet]. Haute Autorité de Santé. [cité 1 juin 2020]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/c_464893/fr/prise-en-charge-masso-kinesitherapie-dans-la-lombalgie-commune-modalites-de-prescription
5. Prescription de la ceinture lombaire [Internet]. Lombalgie. [cité 26 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.lombalgie.fr/ceintures-lombaires/prescription/>
6. Molimard J, Bonnaire R, Han WS, Convert R, Calmels P. In-silico pre-clinical trials are made possible by a new simple and comprehensive lumbar belt mechanical model based on the Law of Laplace including support deformation and adhesion effects. *PLoS ONE.* 2019;14(3):e0212681.
7. Karine P. Haute Autorité de santé. 2019;178.
8. Kienle A, Saidi S, Oberst M. Effect of 2 different thoracolumbar orthoses on the stability of the spine during various body movements. *Spine.* 1 août 2013;38(17):E1082-1089.
9. Jegede KA, Miller CP, Bible JE, Whang PG, Grauer JN. The effects of three different types of orthoses on the range of motion of the lumbar spine during 15 activities of daily living. *Spine.* 15 déc 2011;36(26):2346-53.
10. Utter A, Anderson ML, Cunniff JG, Kaufman KR, Jelsing EJ, Patrick TA, et al. Video fluoroscopic analysis of the effects of three commonly-prescribed off-the-shelf orthoses on vertebral motion. *Spine.* 20 mai 2010;35(12):E525-529.
11. Choo YJ, Chang MC. Effectiveness of orthoses for treatment in patients with spinal pain. *Yeungnam Univ J Med.* avr 2020;37(2):84-9.
12. Sato N, Sekiguchi M, Kikuchi S, Shishido H, Sato K, Konno S. Effects of long-term corset wearing on chronic low back pain. *Fukushima J Med Sci.* 2012;58(1):60-5.
13. Samani M, Shirazi ZR, Hadadi M, Sobhani S. A randomized controlled trial comparing the long-term use of soft lumbosacral orthoses at two different pressures in patients with chronic nonspecific low back pain. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* oct 2019;69:87-95.
14. Anders C, Hübner A. Influence of elastic lumbar support belts on trunk muscle function in patients with non-specific acute lumbar back pain. *PLoS ONE.* 2019;14(1):e0211042.

15. Bataller-Cervero AV, Rabal-Pelay J, Roche-Seruendo LE, Lacárcel-Tejero B, Alcázar-Crevillén A, Villalba-Ruete JA, et al. Effectiveness of lumbar supports in low back functionality and disability in assembly-line workers. *Ind Health*. 26 sept 2019;57(5):588-95.
16. Azadinia F, Ebrahimi E, Kamyab M, Parnianpour M, Cholewicki J, Maroufi N. Can lumbosacral orthoses cause trunk muscle weakness? A systematic review of literature. *Spine J*. 2017;17(4):589-602.
17. Takasaki H, Miki T. The impact of continuous use of lumbosacral orthoses on trunk motor performance: a systematic review with meta-analysis. *The Spine Journal*. 1 juin 2017;17(6):889-900.
18. de Looze MP, Bosch T, Krause F, Stadler KS, O'Sullivan LW. Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load. *Ergonomics*. mai 2016;59(5):671-81.
19. Abdoli-E M, Agnew MJ, Stevenson JM. An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. juin 2006;21(5):456-65.
20. Abdoli-E M, Stevenson JM. The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. mars 2008;23(3):372-80.
21. Frost DM, Abdoli-E M, Stevenson JM. PLAD (personal lift assistive device) stiffness affects the lumbar flexion/extension moment and the posterior chain EMG during symmetrical lifting tasks. *J Electromyogr Kinesiol*. déc 2009;19(6):e403-412.
22. Graham RB, Agnew MJ, Stevenson JM. Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: assessment of EMG response and user acceptability. *Appl Ergon*. sept 2009;40(5):936-42.
23. Whitfield BH, Costigan PA, Stevenson JM, Smallman CL. Effect of an on-body ergonomic aid on oxygen consumption during a repetitive lifting task. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 1 janv 2014;44(1):39-44.
24. Sadler EM, Graham RB, Stevenson JM. The personal lift-assist device and lifting technique: a principal component analysis. *Ergonomics*. avr 2011;54(4):392-402.
25. Lotz CA, Agnew MJ, Godwin AA, Stevenson JM. The effect of an on-body personal lift assist device (PLAD) on fatigue during a repetitive lifting task. *J Electromyogr Kinesiol*. avr 2009;19(2):331-40.
26. Ulrey BL, Fathallah FA. Effect of a personal weight transfer device on muscle activities and joint flexions in the stooped posture. *J Electromyogr Kinesiol*. févr 2013;23(1):195-205.
27. Ulrey BL, Fathallah FA. Subject-specific, whole-body models of the stooped posture with a personal weight transfer device. *J Electromyogr Kinesiol*. févr 2013;23(1):206-15.
28. Baltrusch SJ, van Dieën JH, van Bennekom C a. M, Houdijk H. The effect of a passive trunk exoskeleton on functional performance in healthy individuals. *Appl Ergon*. oct 2018;72:94-106.
29. Baltrusch SJ, van Dieën JH, Koopman AS, Näf MB, Rodriguez-Guerrero C, Babič J, et al. SPEXOR passive spinal exoskeleton decreases metabolic cost during symmetric repetitive lifting. *Eur J Appl Physiol*. 11 déc 2019;

30. Miura K, Kadone H, Koda M, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, et al. The hybrid assistive limb (HAL) for Care Support successfully reduced lumbar load in repetitive lifting movements. *J Clin Neurosci.* juill 2018;53:276-9.
31. Johnson AP, Gorsic M, Regmi Y, Davidson BS, Dai B, Novak D. Design and Pilot Evaluation of a Reconfigurable Spinal Exoskeleton. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2018;2018:1731-4.
32. Baltrusch SJ, van Dieën JH, Bruijn SM, Koopman AS, van Bennekom C a. M, Houdijk H. The effect of a passive trunk exoskeleton on metabolic costs during lifting and walking. *Ergonomics.* juill 2019;62(7):903-16.
33. Bosch T, van Eck J, Knitel K, de Looze M. The effects of a passive exoskeleton on muscle activity, discomfort and endurance time in forward bending work. *Appl Ergon.* mai 2016;54:212-7.
34. Alemi MM, Geissinger J, Simon AA, Chang SE, Asbeck AT. A passive exoskeleton reduces peak and mean EMG during symmetric and asymmetric lifting. *J Electromyogr Kinesiol.* août 2019;47:25-34.
35. Naf MB, De Rijcke L, Guerrero CR, Millard M, Vanderborgh B, Lefeber D. Towards low back support with a passive biomimetic exo-spine. *IEEE Int Conf Rehabil Robot.* 2017;2017:1165-70.
36. Lazzaroni M, Toxiri S, Caldwell DG, Anastasi S, Monica L, Momi ED, et al. Acceleration-based Assistive Strategy to Control a Back-support Exoskeleton for Load Handling: Preliminary Evaluation. *IEEE Int Conf Rehabil Robot.* 2019;2019:625-30.
37. Floyd WF, Silver PH. The function of the erectores spinae muscles in certain movements and postures in man. *J Physiol (Lond).* 28 juill 1955;129(1):184-203.
38. Kippers V, Parker AW. Posture related to myoelectric silence of erectores spinae during trunk flexion. *Spine.* oct 1984;9(7):740-5.
39. Schultz AB, Haderspeck-Grib K, Sinkora G, Warwick DN. Quantitative studies of the flexion-relaxation phenomenon in the back muscles. *J Orthop Res.* 1985;3(2):189-97.
40. McGill SM, Kippers V. Transfer of loads between lumbar tissues during the flexion-relaxation phenomenon. *Spine.* 1 oct 1994;19(19):2190-6.
41. Shirado O, Ito T, Kaneda K, Strax TE. Flexion-relaxation phenomenon in the back muscles. A comparative study between healthy subjects and patients with chronic low back pain. *Am J Phys Med Rehabil.* avr 1995;74(2):139-44.
42. McGorry RW, Hsiang SM, Fathallah FA, Clancy EA. Timing of activation of the erector spinae and hamstrings during a trunk flexion and extension task. *Spine.* 15 févr 2001;26(4):418-25.
43. Colloca CJ, Hinrichs RN. The biomechanical and clinical significance of the lumbar erector spinae flexion-relaxation phenomenon: a review of literature. *J Manipulative Physiol Ther.* oct 2005;28(8):623-31.
44. Sihvonen T, Partanen J, Hänninen O, Soimakallio S. Electric behavior of low back muscles during lumbar pelvic rhythm in low back pain patients and healthy controls. *Arch Phys Med Rehabil.* déc 1991;72(13):1080-7.
45. Grabiner MD, Jeziorowski JJ, Divekar AD. Isokinetic Measurements of Trunk Extension and Flexion

- Performance Collected With the Biodex Clinical Data Station. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1 juin 1990;11(12):590-8.
46. Guilhem G, Giroux C, Couturier A, Maffiuletti NA. Validity of trunk extensor and flexor torque measurements using isokinetic dynamometry. *Journal of Electromyography and Kinesiology.* 2014;24(6):986–993.
 47. Newton M, Waddell G. Trunk strength testing with iso-machines. Part 1: Review of a decade of scientific evidence. *Spine.* 1 juin 1993;18(7):801-11.
 48. A ZBM, S Z, Fz BS, Dg B, A C. ISOKINETIC TRUNK STRENGTH, VALIDITY, RELIABILITY, NORMATIVE DATA AND RELATION TO PHYSICAL PERFORMANCE AND LOW BACK PAIN: A REVIEW OF THE LITERATURE. *Int J Sports Phys Ther.* févr 2020;15(1):160-74.
 49. Delitto A, Rose SJ, Crandell CE, Strube MJ. Reliability of isokinetic measurements of trunk muscle performance. *Spine.* juill 1991;16(7):800-3.
 50. Verbrugghe J, Agten A, Eijnde BO, Vandenabeele F, De Baets L, Huybrechts X, et al. Reliability and agreement of isometric functional trunk and isolated lumbar strength assessment in healthy persons and persons with chronic nonspecific low back pain. *Phys Ther Sport.* juill 2019;38:1-7.
 51. LES APPAREILS D'ISOCINETISME EN EVALUATION ET EN - Santé Et Remise En Forme [Internet]. doczz.fr. [cité 29 avr 2020]. Disponible sur: <http://doczz.fr/doc/2918960/les-appareils-d-isocinetisme-en-evaluation-et-en>
 52. Keller A, Johansen JG, Hellesnes J, Brox JI. Predictors of isokinetic back muscle strength in patients with low back pain. *Spine.* 1 févr 1999;24(3):275-80.
 53. [Use of isokinetic techniques vs standard physiotherapy in patients with chronic low back pain. Preliminary results]. - PubMed - NCBI [Internet]. [cité 27 avr 2020]. Disponible sur: [https://www-ncbi.nlm.nih.gov.ressources-electroniques.univ-lille.fr/pubmed/14967569](https://www.ncbi.nlm.nih.gov.ressources-electroniques.univ-lille.fr/pubmed/14967569)
 54. Urzica I, Tiffreau V, Popielarz S, Duquesnoy B, Thevenon A. [Isokinetic trunk strength testing in chronic low back pain. The role of habituation and training to improve measures]. *Ann Readapt Med Phys.* juin 2007;50(5):271-4.
 55. Olivier N, Lepretre A, Caby I, Dupuis MA, Prieur F. [Does exercise therapy for chronic lower-back pain require daily isokinetic reinforcement of the trunk muscles?]. *Ann Readapt Med Phys.* mai 2008;51(4):284-91.
 56. Sertpoyraz F, Eyigor S, Karapolat H, Capaci K, Kirazli Y. Comparison of isokinetic exercise versus standard exercise training in patients with chronic low back pain: a randomized controlled study. *Clin Rehabil.* mars 2009;23(3):238-47.
 57. Yahia A, Jribi S, Ghroubi S, Elleuch M, Baklouti S, Habib Elleuch M. Evaluation of the posture and muscular strength of the trunk and inferior members of patients with chronic lumbar pain. *Joint Bone Spine.* mai 2011;78(3):291-7.
 58. Kato S, Murakami H, Inaki A, Mochizuki T, Demura S, Nakase J, et al. Innovative exercise device for the abdominal trunk muscles: An early validation study. *PLoS ONE.* 2017;12(2):e0172934.
 59. Kato S, Inaki A, Murakami H, Kurokawa Y, Mochizuki T, Demura S, et al. Reliability of the muscle

- strength measurement and effects of the strengthening by an innovative exercise device for the abdominal trunk muscles. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 15 oct 2019;
60. Kato S, Murakami H, Demura S, Yoshioka K, Shinmura K, Yokogawa N, et al. Abdominal trunk muscle weakness and its association with chronic low back pain and risk of falling in older women. *BMC Musculoskelet Disord.* 3 juin 2019;20(1):273.
 61. Roussel N, Nijs J, Truijen S, Breugelmans S, Claes I, Stassijns G. Reliability of the assessment of lumbar range of motion and maximal isometric strength. *Arch Phys Med Rehabil.* avr 2006;87(4):576-82.
 62. Roussel NA, Truijen S, De Kerf I, Lambeets D, Nijs J, Stassijns G. Reliability of the assessment of lumbar range of motion and maximal isometric strength in patients with chronic low back pain. *Arch Phys Med Rehabil.* avr 2008;89(4):788-91.
 63. De Ridder E, Danneels L, Vleeming A, Vanderstraeten G, Van Ranst M, Van Oosterwijck J. Trunk extension exercises: How is trunk extensor muscle recruitment related to the exercise dosage? *J Electromyogr Kinesiol.* août 2015;25(4):681-8.
 64. Stevens VK, Parlevliet TG, Coorevits PL, Mahieu NN, Bouche KG, Vanderstraeten GG, et al. The effect of increasing resistance on trunk muscle activity during extension and flexion exercises on training devices. *J Electromyogr Kinesiol.* juin 2008;18(3):434-45.
 65. Taimela S, Härkäpää K. Strength, mobility, their changes, and pain reduction in active functional restoration for chronic low back disorders. *J Spinal Disord.* août 1996;9(4):306-12.
 66. Graves JE, Pollock ML, Carpenter DM, Leggett SH, Jones A, MacMillan M, et al. Quantitative assessment of full range-of-motion isometric lumbar extension strength. *Spine.* avr 1990;15(4):289-94.
 67. Stark T, Walker B, Phillips JK, Fejer R, Beck R. Hand-held dynamometry correlation with the gold standard isokinetic dynamometry: a systematic review. *PM R.* mai 2011;3(5):472-9.
 68. De Blaiser C, De Ridder R, Willems T, Danneels L, Roosen P. Reliability and validity of trunk flexor and trunk extensor strength measurements using handheld dynamometry in a healthy athletic population. *Phys Ther Sport.* nov 2018;34:180-6.
 69. Jubany J, Busquets A, Marina M, Cos F, Angulo-Barroso R. Reliability and validity of a custom-made instrument including a hand-held dynamometer for measuring trunk muscle strength. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 2015;28(2):317-26.
 70. Azghani MR, Farahmand F, Meghdari A, Vossoughi G, Parnianpour M. Design and evaluation of a novel triaxial isometric trunk muscle strength measurement system. *Proc Inst Mech Eng H.* août 2009;223(6):755-66.
 71. Dehail P, Duclos C, Barat M. Electrical stimulation and muscle strengthening. *Ann Readapt Med Phys.* juill 2008;51(6):441-51.
 72. Gondin J, Guette M, Ballay Y, Martin A. Electromyostimulation training effects on neural drive and muscle architecture. *Med Sci Sports Exerc.* août 2005;37(8):1291-9.

73. Maffiuletti NA. Physiological and methodological considerations for the use of neuromuscular electrical stimulation. *Eur J Appl Physiol.* sept 2010;110(2):223-34.
74. Barss TS, Ainsley EN, Claveria-Gonzalez FC, Luu MJ, Miller DJ, Wiest MJ, et al. Utilizing Physiological Principles of Motor Unit Recruitment to Reduce Fatigability of Electrically-Evoked Contractions: A Narrative Review. *Arch Phys Med Rehabil.* 2018;99(4):779-91.
75. Herrero AJ, Martín J, Martín T, Abadía O, Fernández B, García-López D. Short-term effect of strength training with and without superimposed electrical stimulation on muscle strength and anaerobic performance. A randomized controlled trial. Part I. *J Strength Cond Res.* juin 2010;24(6):1609-15.
76. Cho HK, Jung GS, Kim EH, Cho YW, Kim SW, Ahn SH. The effects of neuromuscular electrical stimulation at different frequencies on the activations of deep abdominal stabilizing muscles. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 2016;29(1):183-9.
77. Porcari JP, Miller J, Cornwell K, Foster C, Gibson M, McLean K, et al. The effects of neuromuscular electrical stimulation training on abdominal strength, endurance, and selected anthropometric measures. *J Sports Sci Med.* 1 mars 2005;4(1):66-75.
78. Alon G, McCombe SA, Koutsantonis S, Stumphauzer LJ, Burgwin KC, Parent MM, et al. Comparison of the effects of electrical stimulation and exercise on abdominal musculature. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1987;8(12):567-73.
79. Miura M, Seki K, Ito O, Handa Y, Kohzuki M. Electrical stimulation of the abdomen preserves motor performance in the inactive elderly: a randomized controlled trial. *Tohoku J Exp Med.* 2012;228(2):93-101.
80. Hwang U-J, Kwon O-Y, Jung S-H, Kim H-A, Gwak G-T. Effect of neuromuscular electrical stimulation training for abdominal muscles on change of muscle size, strength, endurance and lumbopelvic stability. *J Sports Med Phys Fitness.* févr 2020;60(2):206-13.
81. Ko EJ, Chun MH, Kim DY, Yi JH, Kim W, Hong J. The Additive Effects of Core Muscle Strengthening and Trunk NMES on Trunk Balance in Stroke Patients. *Ann Rehabil Med.* févr 2016;40(1):142-51.
82. Park M, Seok H, Kim S-H, Noh K, Lee SY. Comparison Between Neuromuscular Electrical Stimulation to Abdominal and Back Muscles on Postural Balance in Post-stroke Hemiplegic Patients. *Ann Rehabil Med.* oct 2018;42(5):652-9.
83. Hicks GE, Sions JM, Velasco TO, Manal TJ. Trunk Muscle Training Augmented With Neuromuscular Electrical Stimulation Appears to Improve Function in Older Adults With Chronic Low Back Pain: A Randomized Preliminary Trial. *Clin J Pain.* 2016;32(10):898-906.
84. Pugliese JM, Sions JM, Velasco TO, Hicks GE. Use of trunk muscle training and neuromuscular electrical stimulation to reduce pain and disability in an older adult with chronic low back pain: A case report. *Physiother Theory Pract.* août 2019;35(8):797-804.
85. Guo P, Wang J-W, Tong A. Therapeutic effectiveness of neuromuscular electrical stimulation for treating patients with chronic low back pain. *Medicine (Baltimore).* nov 2018;97(48):e13197.
86. Coghlan S, Crowe L, McCarthy U, Minogue C, Caulfield B. Neuromuscular electrical

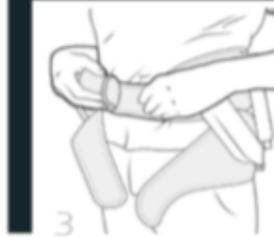
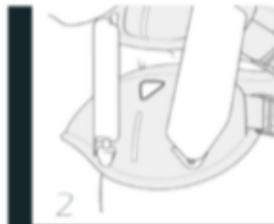
- stimulation training results in enhanced activation of spinal stabilizing muscles during spinal loading and improvements in pain ratings. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2011;2011:7622-5.
87. Baek SO, Cho HK, Jung GS, Son SM, Cho YW, Ahn SH. Verification of an optimized stimulation point on the abdominal wall for transcutaneous neuromuscular electrical stimulation for activation of deep lumbar stabilizing muscles. *Spine J.* 1 sept 2014;14(9):2178-83.
 88. Sions JM, Crippen DC, Hicks GE, Alroumi AM, Manal TJ, Pohlig RT. Exploring Neuromuscular Electrical Stimulation Intensity Effects on Multifidus Muscle Activity in Adults With Chronic Low Back Pain: An Ultrasound Imaging-Informed Investigation. *Clin Med Insights Arthritis Musculoskelet Disord.* 2019;12:1179544119849570.
 89. Sung W, Wong A, Pourshogi A, Pourrezaei K, Silfies S. Near infrared spectroscopy confirms recruitment of specific lumbar extensors through neuromuscular electrical stimulation. *Physiother Theory Pract.* 28 juin 2018;1-8.
 90. França FR, Burke TN, Hanada ES, Marques AP. Segmental stabilization and muscular strengthening in chronic low back pain: a comparative study. *Clinics (Sao Paulo).* 2010;65(10):1013-7.
 91. Harts CC, Helmhout PH, de Bie RA, Staal JB. A high-intensity lumbar extensor strengthening program is little better than a low-intensity program or a waiting list control group for chronic low back pain: a randomised clinical trial. *Aust J Physiother.* 2008;54(1):23-31.
 92. Kell RT, Asmundson GJG. A comparison of two forms of periodized exercise rehabilitation programs in the management of chronic nonspecific low-back pain. *J Strength Cond Res.* mars 2009;23(2):513-23.
 93. Kell RT, Risi AD, Barden JM. The response of persons with chronic nonspecific low back pain to three different volumes of periodized musculoskeletal rehabilitation. *J Strength Cond Res.* avr 2011;25(4):1052-64.
 94. MD AC. Lower Back Stabilization Exercises for Back Pain [Internet]. *Spine-health*. Disponible sur: <https://www.spine-health.com/wellness/exercise/lower-back-stabilization-exercises-back-pain>
 95. Macedo LG, Maher CG, Latimer J, McAuley JH. Motor control exercise for persistent, nonspecific low back pain: a systematic review. *Phys Ther.* janv 2009;89(1):9-25.
 96. Konlian C. Aquatic therapy: making a wave in the treatment of low back injuries. *Orthop Nurs.* févr 1999;18(1):11-8; quiz 19-20.
 97. Kofotolis N, Kellis E. Effects of two 4-week proprioceptive neuromuscular facilitation programs on muscle endurance, flexibility, and functional performance in women with chronic low back pain. *Phys Ther.* juill 2006;86(7):1001-12.
 98. Areeudomwong P, Wongrat W, Neammesri N, Thongsakul T. A randomized controlled trial on the long-term effects of proprioceptive neuromuscular facilitation training, on pain-related outcomes and back muscle activity, in patients with chronic low back pain. *Musculoskeletal Care.* 2017;15(3):218-29.
 99. Lee C-W, Hwangbo K, Lee I-S. The effects of combination patterns of proprioceptive neuromuscular facilitation and ball exercise on pain and muscle activity of chronic low back pain patients. *J Phys Ther Sci.* janv 2014;26(1):93-6.

100. Shnayderman I, Katz-Leurer M. An aerobic walking programme versus muscle strengthening programme for chronic low back pain: a randomized controlled trial. *Clin Rehabil.* mars 2013;27(3):207-14.
101. Owen PJ, Miller CT, Mundell NL, Verswijveren SJ, Tagliaferri SD, Brisby H, et al. Which specific modes of exercise training are most effective for treating low back pain? Network meta-analysis. *Br J Sports Med.* 30 oct 2019;
102. Searle A, Spink M, Ho A, Chuter V. Exercise interventions for the treatment of chronic low back pain: a systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials. *Clin Rehabil.* déc 2015;29(12):1155-67.
103. van Middelkoop M, Rubinstein SM, Verhagen AP, Ostelo RW, Koes BW, van Tulder MW. Exercise therapy for chronic nonspecific low-back pain. *Best Pract Res Clin Rheumatol.* avr 2010;24(2):193-204.
104. Taylor JB, Goode AP, George SZ, Cook CE. Incidence and risk factors for first-time incident low back pain: a systematic review and meta-analysis. *Spine J.* 1 oct 2014;14(10):2299-319.
105. Masson E. Physiologie cardiorespiratoire du mouvement [Internet]. EM-Consulte. [cité 11 mai 2020]. Disponible sur: <https://www.em-consulte.com/article/891890/physiologie-cardiorespiratoire-du-mouvement>

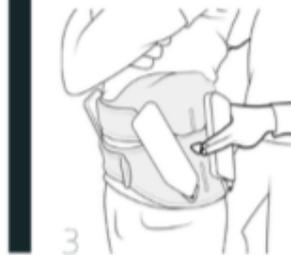
ANNEXE 1 :Schéma de mise en place d'Atlas, fourni par Japet.



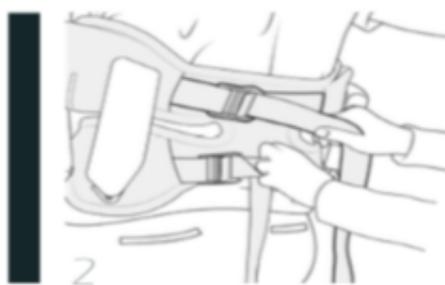
**POSITIONNEMENT
DE LA CEINTURE**



**RÉGLAGE DE LA PARTIE
BASSE DE LA CEINTURE**



**RÉGLAGE DE LA PARTIE
HAUTE DE LA CEINTURE**



ANNEXE 2 : FORMULAIRE du COMITE D'ETHIQUE de la RECHERCHE

RESUME DU PROTOCOLE

Merci de noter les noms et adresses mail (1) de la personne en charge du dépôt du dossier ainsi que (2) du responsable scientifique afin de leur envoyer la réponse du comité :

1 : nicolas.olivier@univ-lille.fr

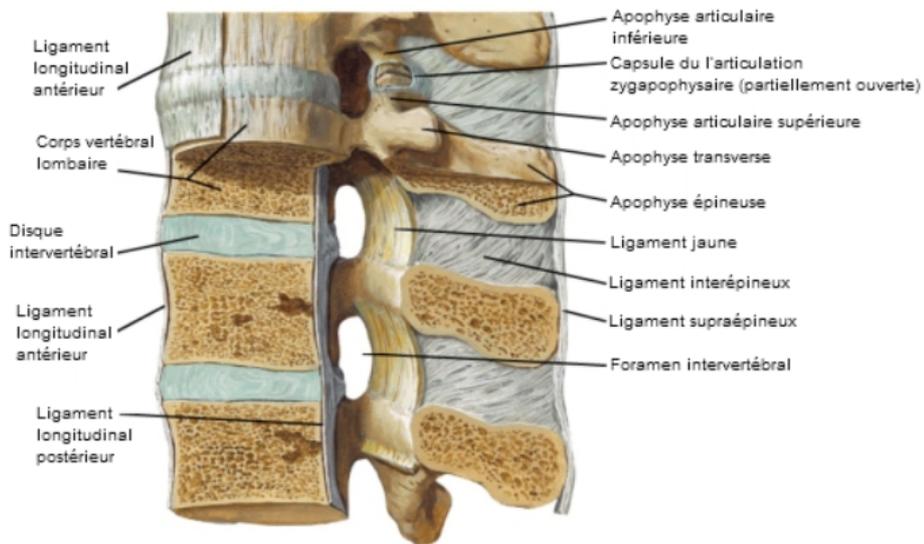
2 : ingrid.soust@chru-lille.fr

2 : vincent.tiffreau@chru-lille.fr

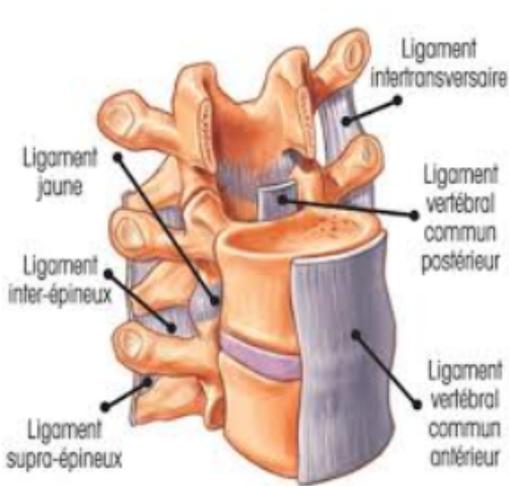
Titre	Evaluation de la dépense énergétique lors d'une série d'efforts en flexion et extension du tronc réalisée avec un dispositif médical innovant (Exosquelette du rachis ATLAS marqué CE norme Iso équipé d'actionneurs exerçant des forces verticales sur le tronc)
Acronyme	Atlas Renforcement
Financier cas échéant (Organisme demandeur)	Japet Medical Devices
Organisme responsable de la recherche (Promoteur)	Université de Lille, laboratoire URePSSS
Coordinateur(s) scientifique(s) (étudiants, chercheurs, enseignant-chercheurs)	Nicolas Olivier , Vincent Tiffreau, Ingrid Soust
Responsable scientifique unique	Nicolas Olivier
Version du protocole	1
Justification de la recherche	Vérifier l'efficacité du dispositif Atlas pour sa fonction d'aide au renforcement musculaire.
Objectif principal	Évaluer l'effet sur la dépense énergétique aérobie lors d'une série d'efforts en flexion et extension du tronc d'un dispositif médical innovant (ATLAS)
Population(s) concernée(s)	Volontaires sains parmi des étudiants en STAPS à Eurasport.
Nombre de participants	15
Procédure ou méthode (préciser les équipements, le cas échéant)	deux séries d'effort avec alternance de flexions et extensions du tronc pendant 3 minutes : - en portant le dispositif - sans le dispositif. Un temps de repos sera respecté entre chaque série jusqu'au retour à la fréquence cardiaque de repos. Le fait de commencer avec ou sans le dispositif sera randomisé. Le dispositif sera ajusté individuellement à la taille de chaque participant selon la notice d'utilisation du fabricant et le niveau de résistance sera le même pour tous les participants. Un temps de familiarisation avec le dispositif sera respecté

	<p>jusqu'à ce que les volontaires déclarent être prêts à effectuer la série.</p> <p>Chaque série de flexion/extension du tronc sera effectuée pendant une durée de 3 minutes.</p> <p>Les mouvements seront exécutés au même rythme contrôlé par un métronome, avec une fréquence de 50/min.</p> <p>L'amplitude des mouvements sera la même pour tous les participants, fixée par la course des actionneurs.</p> <p>Un examen médical préliminaire comprenant une auscultation cardio-pulmonaire et un interrogatoire permettra de s'assurer de l'absence de contre-indications aux tests par les médecins responsables de l'étude.</p> <p>Critères d'exclusion : rachialgies, antécédent personnel de pathologie cardiaque et/ou pulmonaire, déformation thoracique ou abdominale gênant la mise en place de la ceinture, antécédent personnel de scoliose.</p> <p>Critères d'inclusion : âge > 18 ans.</p>
Variables ou paramètres mesurés	<p>Échanges gazeux (consommation d'O₂ et CO₂ expiré) par un dispositif de mesure portatif (MetaMax® 3B, Cortex,Germany) mL/Min/Kg</p> <p>Fréquence cardiaque (cardio-fréquencemètre portatif) en battements/minute</p> <p>Tension artérielle systolique et diastolique en mmHg</p> <p>Fréquence respiratoire : cycles/minute</p>
Analyse statistique	<p>Analyse descriptive et comparative de données comparaison de moyenne des deux groupes par un test de student avec un seuil de significativité fixé à $p \leq 0,05$.</p>
Lieu d'étude	<p>Centre Eurasport, Université de Lille</p>
Calendrier prévisionnel	<p>Tests sur volontaires sains septembre 2020.</p> <p>Analyse des résultats en novembre 2020.</p>

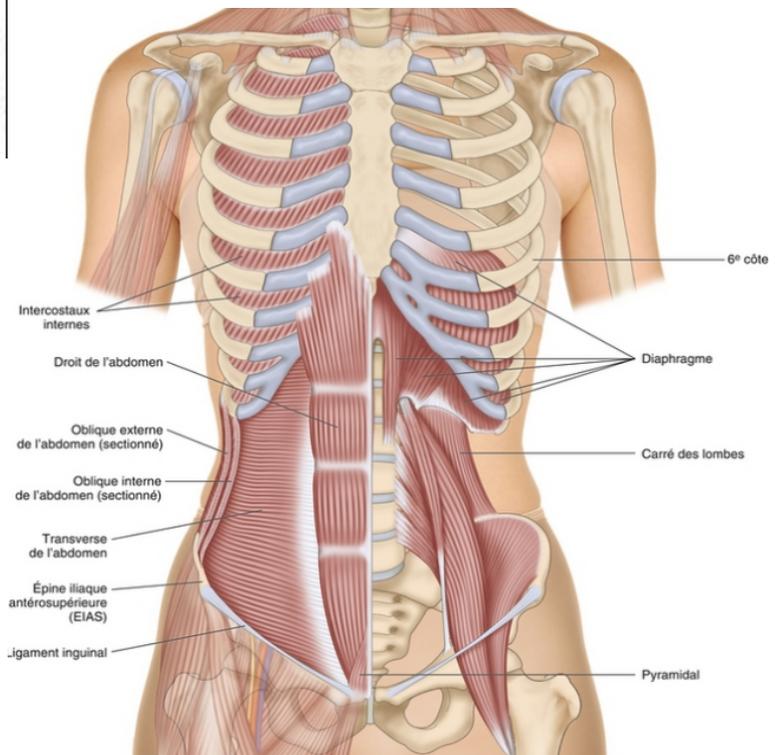
ANNEXE 3 : Rappels anatomiques du tronc



Structures ligamentaires rachidiennes, vue de profil (Source : Netter 2006, planche 158)



Structures ligamentaires rachidiennes, vue de trois-quarts face



Muscles antérieurs du tronc (Source : clemedicine.com)

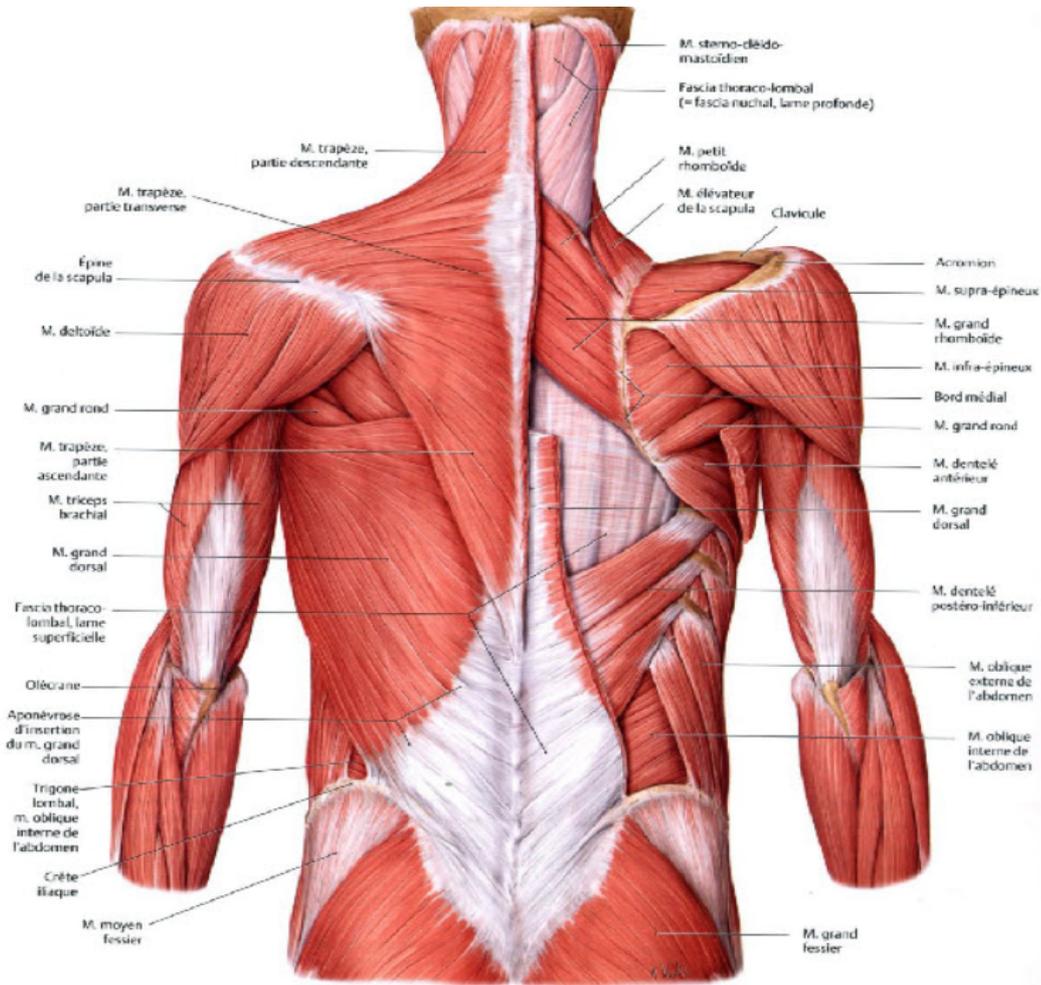
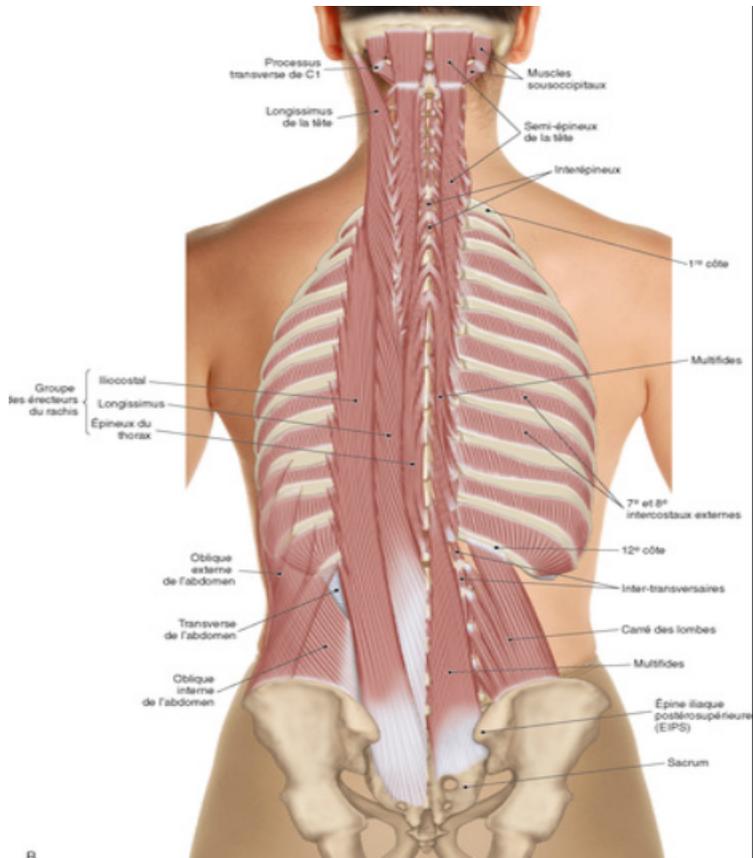


Image du haut : Muscles postérieurs du
plans superficiel et moyen (Source:
gremmo.com)

Image du dessous : Muscles postérieurs
tronc, plan profond (Source :
clemedicine.com)



tronc,
du

AUTEUR : Nom : SOUST

Prénom : Ingrid

Date de soutenance : 23/06/2020

Titre de la thèse : Application du dispositif Atlas, un exosquelette d'assistance lombaire, en mode renforcement musculaire.

Thèse - Médecine - Lille 2020

Cadre de classement : Médecine physique et de réadaptation

DES + spécialité : Médecine physique et de réadaptation

Mots-clés : exosquelette, lombalgie, renforcement musculaire

Résumé :

Contexte : De nombreux dispositifs applicables au rachis ont vu le jour en vue d'apporter une aide à la lombalgie chronique, dans le domaine de la médecine et de la santé au travail. Les exosquelettes et ceintures lombaires concentrent leur action dans le soulagement de la douleur et dans la prévention primaire et secondaire, tandis que l'isocinétisme et d'autres dispositifs sont conçus pour l'évaluation musculaire et le renforcement musculaire du tronc. Le nouveau dispositif Atlas, un exosquelette lombaire, combine toutes ces différentes fonctions via des actionneurs et une interface connectée, dans le but d'être un outil pertinent dans la rééducation de la lombalgie chronique. Dans ce contexte, nous avons élaboré un protocole afin d'évaluer la consommation de dioxygène lors de l'utilisation de Atlas en mode renforcement musculaire.

Protocole : Un minimum de 15 volontaires sains devra réaliser une série de flexion et d'extension du rachis avec et sans le dispositif Atlas. La durée de l'exercice sera de 3 minutes. Le rythme auquel seront faits les mouvements sera fixé par un métronome. Le fait de commencer avec ou sans le dispositif sera randomisé. Le critère de jugement principal sera le débit de consommation de dioxygène (VO₂). Les critères de jugement secondaires recueillis seront le débit d'éjection de dioxyde de carbone (VCO₂), la fréquence cardiaque, la fréquence respiratoire et la tension artérielle.

Retombées cliniques : L'hypothèse émise est que le port du dispositif Atlas dans la réalisation de cet exercice augmentera le VO₂ d'environ 50%. Ce travail s'inscrit dans le but d'utiliser Atlas en conditions réelles pour étayer les données sur son action et efficacité afin de pouvoir envisager la réalisation de protocoles de rééducation avec ce dispositif chez des patients lombalgiques.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur André THEVENON

Asseseurs : Monsieur le Professeur Julien PACCOU

Monsieur le Chef de clinique Fabien MORETTO

Monsieur le Docteur Alain CHEVUTSCHI

Directeur de thèse : Monsieur le Professeur Vincent TIFFREAU

